



TITLE:

衝撃大電流に対する接地抵抗の低減効果(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

林, 宗明

CITATION:

林, 宗明. 衝撃大電流に対する接地抵抗の低減効果. 京都大学, 1962, 工学博士

ISSUE DATE:

1962-02-13

URL:

<https://doi.org/10.14989/161931>

RIGHT:

衝 撃 大 電 流 に 対 す る
接 地 抵 抗 の 低 減 効 果

林 宗 明

衝 撃 大 電 流 に 対 す る 接 地 抵 抗 の 低 減 効 果

昭 和 3 5 年 1 2 月

林 宗 明

DOC
1961
6
電気系

衝撃大電流に対する 接地抵抗の低減効果

目 次

緒 言	1
第1部 接地電極の集中インピーダンスと土中ストリーマの観察	3
内容梗概	3
第1章 接地電極の接地抵抗	3
§ 1 打込棒の定常接地抵抗	3
§ 2 埋設地線の定常接地抵抗	4
§ 3 刺状電極の定常接地抵抗	6
a. 細長い回転楕円体状の電場	7
b. 刺状電極の電界の強さ及び接地抵抗	7
c. 接地電極に刺を附した場合の定常接地抵抗	10
§ 4 接地抵抗の低減効果	11
a. 土中ストリーマによる場合	11
b. 電流値により、土の比抵抗が変化する場合	13
第2章 実験装置	16
§ 1 衝撃電圧発生装置	16
a. 回路定数及び電圧波形	16
b. 充電方式及び起動	19
c. 遮断波用回路	20
§ 2 測定器	21
a. オシログラフ	22
b. 分圧器、電流測定用シャント、測定用ケーブル其他	23
§ 3 容器及び資料	23

a. 土の容器	24
b. 資料土壌	26
c. 中心電極	26
第3章 土壌の電氣的性質	27
§ 1 土 壌 水	27
§ 2 土の電導性	27
a. 微小電流に対する電氣伝導	27
b. 比抵抗の測定結果とその考察	28
§ 3 土の電氣的破壊	30
a. 土の破壊電圧とその考察	31
b. 火花のおくれ	34
§ 4 水の破壊電圧	35
第4章 土中ストリーマの観察	38
§ 1 概 説	38
§ 2 土中ストリーマの形状	38
a. 土の比抵抗との関係	44
b. 印加電圧の波尾長との関係	46
c. 実験方法の検討と実験結果の考察	46
d. 透明固体絶縁物の破壊	49
e. 比抵抗の変化とストリーマの形状との関係	50
§ 3 土中ストリーマの到達距離	50
§ 4 土中ストリーマの平均進展速度	59
§ 5 土中ストリーマの成長	73
第5章 電流による土の比抵抗の変化	79
§ 1 概 説	79
§ 2 電流密度対比抵抗特性(i - P 特性)	79
第6章 線型素子による接地抵抗の表示	83
§ 1 概 説	83

§ 2	等価回路の解析	84
§ 3	等価の程度	85
§ 4	各種の変数に対する素子の変化	93
	a. 有利球状接地電極の球の直径及び刺の長さとの関係	93
	b. 印加電圧を変化する場合	93
§ 5	考 察	108
第 1 部の総括		109
第 2 部 接地抵抗の低減		112
内容梗概		112
第 7 章 有利電極の接地抵抗		112
§ 1	概 説	112
§ 2	有利電極より発生する土中ストリーマ像	115
	a. 直径 4cm の有利球状電極	115
	b. 直径 4cm の有利円環状電極	115
	c. 直径 8cm の有利球状電極	116
	d. 数本の刺を附せる円環状電極	116
§ 3	有利電極の接地抵抗の測定	116
	a. 中心電極が一定で刺の長さを変化する場合	121
	b. 高抵抗土壌（赤土）における接地抵抗	130
	c. 環状電極に於ける接地抵抗	132
	d. 球状接地電極の直径及び土の比抵抗を変化する場合	134
	e. 環状電極の直径を変化する場合	134
§ 4	電圧電流波形と刺の効果	147
	a. 電流の波頭長と刺の効果	147
	b. 刺の有無と電流の立上り時間	149
	c. 電圧の立上り時間とストリーマ平均速度	150
§ 5	有利電極の接地抵抗に関する考察	150
第 8 章 接地電極の周辺に木炭粉を配置する際の接地抵抗		154

§ 1	概 説	154
§ 2	木炭粉の含有率を変化する場合	154
§ 3	木炭粉の配置の直径を変化する場合	158
第9章	コンクリート電極の接地抵抗	160
§ 1	概 説	160
§ 2	コンクリート電極	160
§ 3	コンクリート電極の接地抵抗	161
§ 4	コンクリートの電位破壊傾度	173
§ 5	コンクリート電極より発生する土中ストリーマ	173
	a. 土中ストリーマ像	173
	b. コンクリート中のストリーマの進展速度	173
	c. コンクリート電極周辺の土壌の電位破壊	176
§ 6	有刺コンクリート電極	180
§ 7	コンクリートの機械的強度	182
	a. 添加物とコンクリートの機械的強度	182
	b. 電氣的破壊後のコンクリートの機械的強度	183
第2部	の総括	193
第3部	埋設地線上の進行波	195
	内容梗概	195
第10章	無刺埋設地線の過渡抵抗	195
§ 1	概 説	195
§ 2	埋設地線の分布定数	195
§ 3	1本の打込棒と埋設地線とを併用する塔脚の電位	196
§ 4	2本の打込棒を埋設地線の両端に有する塔脚の電位	201
第11章	有刺埋設地線を有する塔脚の電位	202
§ 1	埋設地線を有する塔脚の電位	202
	a. 影像インピーダンスを負荷とする場合	204
	b. 終端開放の場合	204

C. 計 算 結 果	206
§ 2 埋設地線に沿う電位分布	209
a. 映像インピーダンスを負荷とする場合	209
b 終端解放の場合	210
§ 3 埋設地線の周辺に土中ストリーマが発生する場合の過渡特性	213
第3部の総括	217
結 言 謝 辞	218
参 考 文 献	220

緒 言

長距離送電線の設計に於いては効率のよい電力伝送と電線の確実な絶縁支持との二つが要求される。特に絶縁の問題は、電力需要の増加、長距離送電の実施、及び送電电压の上昇に對し、一層重要性を加へてきてゐる。

一般に送電線は、内雷によりその絶縁が破れることは殆んど無く、外雷の直撃によるものが大部分である。公知の如く、雷による事故の他の原因に対する割合は公称電圧の高い線路程大きくなるのであつて超高压送電線の耐雷設計が送電电压上昇と共に重要視されることとなる。

雷閃絡の防止のため (1) 架空地線による雷遮蔽を行う。 (2) 逆閃絡及び径間閃絡を防止するため埋設地線により鉄塔塔脚接地抵抗を充分低い値に保持し、且つ架空地線及び導線間隔を大きくとる、の二種の設備をあげるべきである。

この中 (1) の雷遮蔽が充分であつて、雷電流が架空地線より鉄塔を経て大地に流入する場合、或は鉄塔に雷の直撃がある場合の鉄塔の電圧上昇による逆閃絡は、鉄塔が甚だ高い場合をのぞき、主としてその接地抵抗 R_T と電流 I との積 $R_T I$ により支配される。塔脚の接地抵抗は電流に對しては接地電極の湧現抵抗、進行波に對しては、その波長イムピーダンスにより定まるが、特に後者の場合には、その伝播特性は複雑な特性を示し、特に印加電圧が急峻でその波高値が大きい場合は、大巾に低減することがみとめられる。これは主として土中ストリーマにより接地電極の実効面積が増加するためであつて、その他に接地電極と土壤及び土壤粒子相互間の接触抵抗の減少等の原因が挙げられる。雷害の際の鉄塔の電位上昇は、この低減効果を勘案して計算しなければならぬ。さうにおいては、従来波電荷であつた、この低減効果の原因である土中ストリーマにつき、土中に埋設したX線フィルムを使用して直接的に観察し、その形状、大きさ、及びそれらの時間的变化を明らかにしたものであり、更にこの実験手段により、接地電極より針金の刺を出した場合

の土中ストリーマの生成が低減効果を促進することを示し、この時の低減効果を各種のパラメータにつき測定している。また鉄塔塔脚のコンクリート基礎は、その打込みも深く、接触面積も大きいから、これを導電柱ならしめて接地抵抗の低減に寄与すべく、各種の物質をコンクリートに混入し、その電氣的、機械的特性を測定した。

更に土中ストリーマの観察、接地抵抗の低減効果の測定より得たる資料を基とし、雷電流が鉄塔に印加された場合の鉄塔の電位上昇を進行波の立場より論じている。

第 I 部 接地電極の集中インピーダンス

内 容 梗 概

集中定数と見做されるべき接地電極に対し、その定常接地抵抗を解析すると共に、衡量大電流に対する過渡抵抗を測定し、その際の低減効果の原因とある土中ストリーマの直接的な観察方法、装置及び観察結果につき記す。

第 I 章 接地電極の接地抵抗

§ 1 打込棒の定常接地抵抗

塔脚接地抵抗は、2～3 から 1500～2000Ω の広い範囲に変わるとされており⁽¹⁾、これを 20～30Ω 程度に保つために、打込棒や埋設地線が単独又は併用して用いられる。

接地棒としては亜鉛鍍鉄、銅覆鋼、銅包埋鋼等が用いられ亜鉛メッキ鉄管も使用される。その定常接地抵抗は

$$R_{od} = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{a} - 1 \right) \quad (1-1) \quad 2)$$

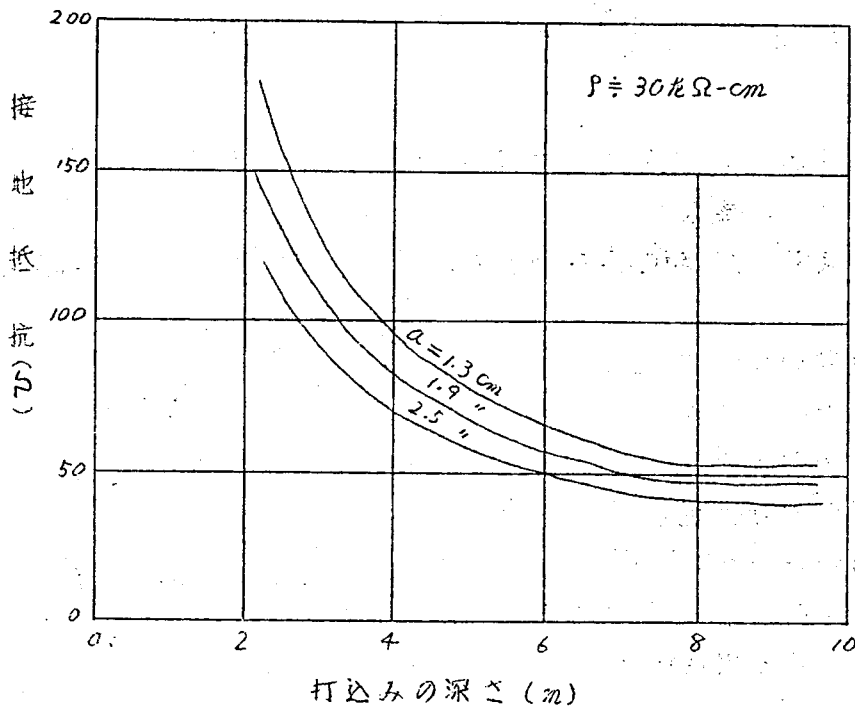
但し R_{od} : 打込棒の接地抵抗

ρ : 土壌の固有抵抗

l : 導体の長さ

a : ϕ の半径

上式より明らか如く、電極の太さは対数の形で入っているから R_{od} には主として長さ l が影響する。このように打込みによって低い接地抵抗を得ようとするのは、最近の内外の傾向である。代表的な場合につき計算例を述べば第 1-1 図の如くである。



第 1-1 図 打込棒の接地抵抗

また同じ太さ、長さ、打込み深さを有する n 本の打込棒が円周上に配置される時の並列抵抗は

$$R_{00} = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi\ell} \left[\ln \frac{4\ell}{a} - 1 + \frac{\ell}{D} \sum_{m=1}^{n-1} \frac{1}{\sin \pi m/n} \right] \quad (1-2) \quad 3)$$

但し

R_n : n 本の打込棒を並列に用いた接地抵抗

D : 円の直径

ρ, ℓ, a : 式 (1-1) 参照

上式より明らかな如く、打込棒の相互間隔を充分にとり、 D を大きくしないと並列抵抗は単一の抵抗を並列数 n で除した値より相当大きくはり不利となる。

§2 埋設地線の定常接地抵抗

固有抵抗の相当高い地域に於て上記の棒状接地施工では、所期の接地抵抗を得ることが困難である場合は埋設地線を使用する。その定常接地抵抗は

$$R_{oc} \doteq \frac{\rho}{2\pi\ell} \left(\ln \frac{2\ell}{a} + \ln \frac{2\ell}{d} \right) \quad (1-3)$$

但し R_{oc} : 埋設地線の接地抵抗

d : 埋設深さ

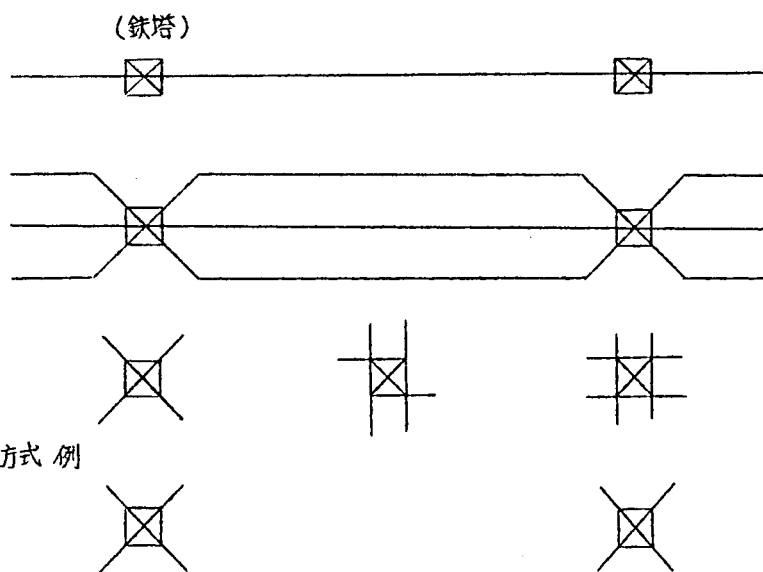
ℓ : 導体の長さ

a : " 半径

上式より明らかな如く、地線の直径、埋め込みの深さは、さ程影響せず、主として導体の長さ ℓ が影響する。しかし単に長さを増加するだけでは、衝雷電流に対するイムピーダンスの点より好ましくないから、塔脚を起鼻として放射状に出すのを有利とする。¹⁾ この際の定常接地抵抗は、地線の中心線が地表にあるとき

$$R_{nc} = \frac{\rho}{n\pi\ell} \left[\ln \frac{2\ell}{a} - 1 + N(n) \right] \quad (1-4)^3)$$

$$\text{但し } N(n) = \sum_{m=1}^{n-1} \ln \frac{1 + \sin \pi m/n}{\sin \pi m/n}$$



第1-2図

埋設地線施工方式例

尚、 $N(n)$ の値は n と共に増加し、 n 本の並列抵抗は1条の場合の接地抵抗を並列数 n にて除した値より相当大きくなることは、打込棒の場合と同様である。 $N(n)$ の値はオ1-1表の如くである。

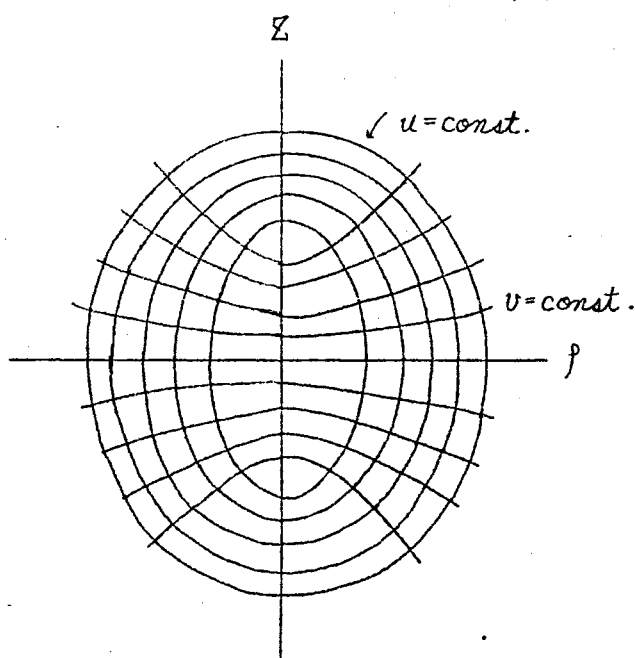
オ1-1表 $N(n)$ の値

n	2	3	4	6	8	12	100
$N(n)$	0.7	1.53	2.45	4.42	6.5	11.0	116

尚、埋設地線配置の例をオ1-2図に示す。

§.3. 刺状電極の定常接地抵抗

回転楕円体を以て近似せられる刺状の電極がその下半分を土中に埋没する場合の電界及び接地抵抗を計算し、球状又は環状電極に刺を附した場合の考察に資する。



オ1-3図 楕円座標

a. 細長い回転楕円体状の電場

楕円座標 (u, v) は、公知の如く、次式にて表わされる。¹⁾ (第1-3図参照)

$$\left. \begin{aligned} \frac{z^2}{u^2} + \frac{p^2}{u^2 - \xi^2} &= 1 \quad (u > \xi) \\ \frac{z^2}{v^2} - \frac{p^2}{\xi^2 - v^2} &= 1 \quad (v < \xi) \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

但し ξ : 二つの焦点間の距離の $1/2$

空間電荷が無いときポアソンの方程式が成立し

$$\nabla^2 V = 0$$

但し V : 電位

上式を楕円座標に変換し、且つ、 $u = \text{const.}$ の面につき考えれば

$$\frac{d}{du} \left(\frac{u^2 - \xi^2}{\xi} \frac{dv}{du} \right) = 0$$
$$\therefore V = A \ln \frac{u + \xi}{u - \xi} + B \quad (1-6)$$

但し A, B : 積分定数

また電界の強さ E は

$$E = - \frac{1}{g_1} \frac{\partial V}{\partial u} = A \frac{\xi}{\sqrt{u^2 - v^2} \sqrt{u^2 - \xi^2}} \quad (1-7)$$

b. 刺状電極の電界の強さ、および接地抵抗

上記の刺状電極が半径 r_e の半球状容器の中心にありその間に比抵抗 ρ の土が満たされている場合につき考察する。但し、 r_e を電極の長さ ℓ に較べて充分大きくとれば、外部電極 (土の容器) の面は長さ 2ℓ なる刺状電極が孤立しているときの等電位面と考えて良い。後記の実験装置はこの条件を満足する。

電極間に V_0 を印加したとき $u_1 = \ell$ における電位 V_1 、及び $u_2 = r_e$ における電位 V_2 は、式 (1-6) より

$$V_1 = A \ln \frac{\ell + \xi}{\ell - \xi} + B$$

$$V_2 = A \ln \frac{r_e + \xi}{r_e - \xi} + B$$

$$V_1 - V_2 = V_0$$

$$\text{また } \xi = \ell \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r_a}{\ell} \right) \right\}$$

但し r_a : 楕円体の短軸長の $1/2$

従って

$$E = \frac{V_0}{\ln \frac{2\ell}{r_a} \left(1 - \frac{\ell}{r_e} \right)} \cdot \frac{\xi}{\sqrt{u^2 - v^2} \sqrt{u^2 - \xi^2}} \quad (1-8)$$

回転軸上の電界の強さは

$$E = \frac{V_0}{\ln \frac{2\ell}{r_a} \left(1 - \frac{\ell}{r_e} \right)} \cdot \frac{\xi}{u^2 - \xi^2} \quad (1-9a)$$

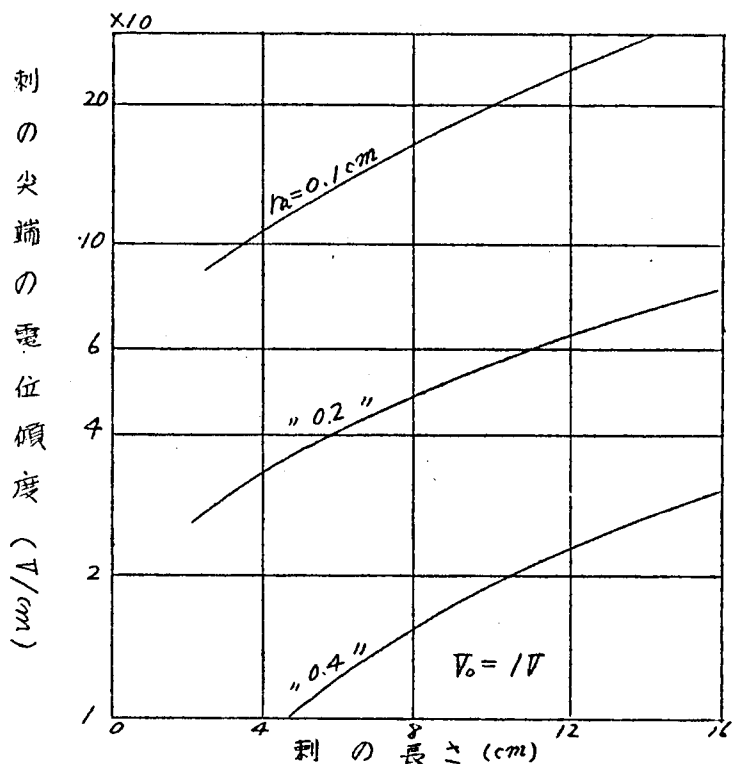
E が最大となるのは上式において $u = \ell$ の場合であって

$$E_m = \frac{V_0 \ell}{r_a^2} \cdot \frac{1}{\ln \frac{2\ell}{r_a} \left(1 - \frac{\ell}{r_e} \right)} \quad (1-9b)$$

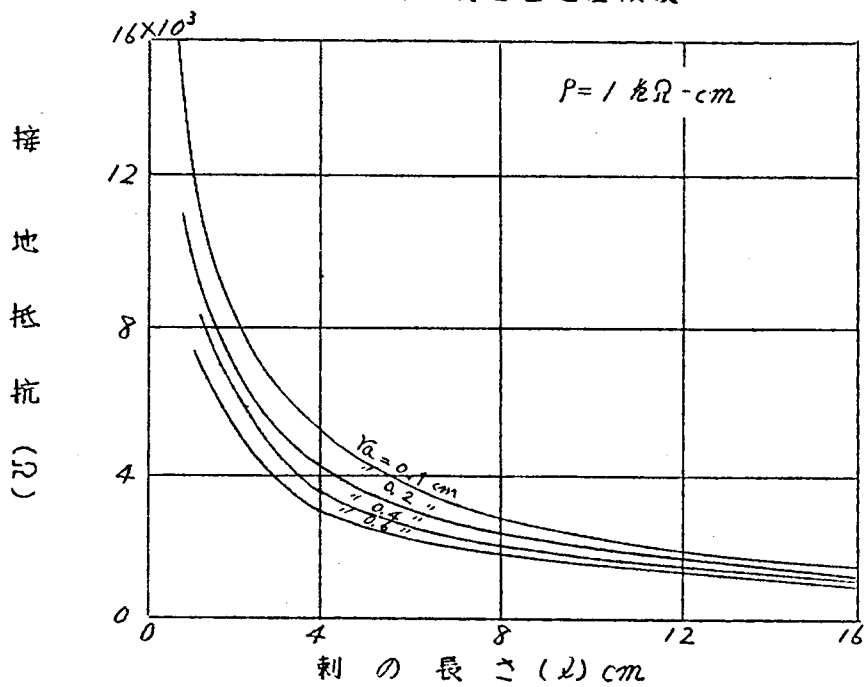
その接地抵抗は

$$R = \frac{\rho}{2\pi\ell} \ln \left\{ \frac{2\ell}{r_a} \left(1 - \frac{\ell}{r_e} \right) \right\} \quad (1-10)$$

式 (1-9b) 及び (1-10) を用いて、 E_m 及び R を特定の例につき計算すれば第 (1-4) 及び (1-5) 図の如くなる。



第1-4図 刺の長さ と 電位傾度

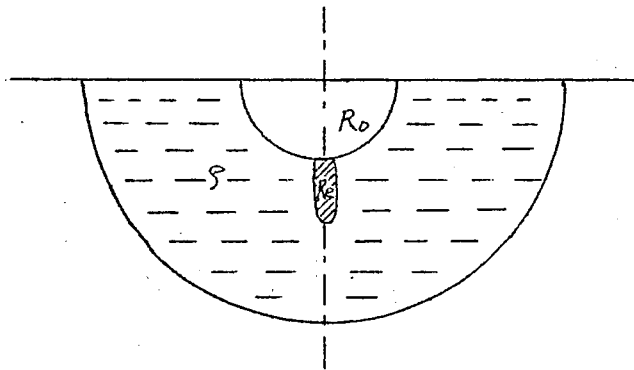


第1-5図 刺の接地抵抗

C. 接地電極に刺を附した場合の定常接地抵抗

棒、球、環等の任意の形状を有する電極に刺を附した場合の近似的な接地抵抗につき考察する。

接地電極及び刺状電極の各々の単独の接地抵抗を R_o , R_e とし、その組合せ電極（有刺電極）の接地抵抗を R_{oe} と置く。（第1-6図参照）



第1-6図 有刺球状電極

この有刺電極において、相互の影響を無視し、電流分布は各々単独にある場合と同一であるとすれば、電圧印加の際の各々の電極より流出する電流は

$$I_o = \frac{V_o}{R_o} \quad I_e = \frac{V_o}{R_e}$$

但し I_o , I_e : 各電極より流出する電流
従って全電流は

$$I = I_o + I_e = V \left(\frac{1}{R_o} + \frac{1}{R_e} \right) = \frac{V}{R_{oe}}$$

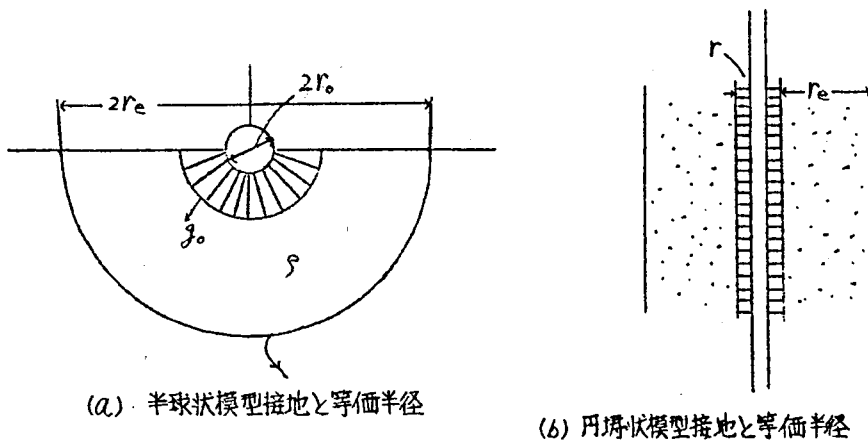
$$\therefore \frac{1}{R_{oe}} = \frac{1}{R_o} + \frac{1}{R_e} \quad (1-11)$$

即ちこの仮定のもとでは、有刺電極の接地抵抗は、各々単独の接地抵抗を並列に置いたものに等しい。故に刺の効果としては、上式の右辺の2項がコンダクタンスの増加として加わることとなる。

§4 接地抵抗の低減効果

a. 土中ストリーマによる場合

一般に土壌中の電位傾度が $5 \sim 40 \text{ kV/cm}$ 程度に達する時は電氣的破壊を生じ、その結果接地電極よりストリーマを生じて接地電極の実効面積は増大し、接地抵抗は低減する。^{4) 5) 6)} この低減効果を比較的簡単な数式にて説明した *Petropoulos* の理論は次の如くである。



第1-7図 等 価 半 径

先ず第1-7(a)図に示す如く同心半球状電極配置を考へ、電極間に固有抵抗 ρ の土を満ちし、内外両電極間に電圧 V_0 を印加すれば、内部電極即ち接地電極表面の電位傾度 g は

$$g = \frac{V_0}{r_0 (1 - r_0/r_e)}$$

但し r_0 : 中心電極半径

r_e : 外部電極半径

また、接地抵抗即ち電極間の抵抗 R_0 は

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi} \frac{1 - r_0/r_e}{r_0} \quad (1-12)$$

土壤が電氣的破壊を起すに必要な電位傾度 g_0 に対する印加電圧を V_e とすると

$$V_e = g_0 r_0 (1 - r_0/r_e)$$

これより放電半球の半径 r は

$$r = \frac{r_e}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{r_e}{2}\right)^2 - r_e \frac{V}{g_0}}$$

r は2つの実根をもつが、 $r \leq r_e/2$ に対してのみ、放電は安定であり従って r の値としては

$$r = \frac{r_e}{2} - \sqrt{\left(\frac{r_e}{2}\right)^2 - r_e \frac{V}{g_0}} \quad (1-13)$$

上式の半径 r に対する接地抵抗 R は

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_e} \right) \quad (1-14)$$

更に、第1-7(b)図に示す如き、同心円環状の電極配置に於いてその終端効果を無視し得る如き場合には、同心球状の場合と同様の考察を進めることにより、放電円環の半径 r' は次式の根となる。

$$V = g_0 \cdot r' \log \frac{r_e}{r'}$$

但し g_0, r_e : 前記に準ずる。

r' に対する単位長さ当りの抵抗 R' は

$$R' = \frac{\rho}{2\pi} \log \frac{r_e}{r'}$$

実験により、衝撃電流に対する土壤の $V-I$ 曲線(電圧-電流特性)をオシログラフにより求めてその抵抗低減の模様を観察すれば、電圧の低い間は Peteropoulos の理論が実験結果に比較的良く一致する。即ち土壤中の放電は電極が同心的に増大したものと考えても実用上差支えないことを示している。

しかしながら、印加電圧が高くなり低減効果が大となるにつれて、上記の理論と実測値とは差異を生ずる。この説明としては

- (1) 土中放電は必ずしも同心球状に行なわれない。
- (2) この現象は Meek の所謂⁸⁾ ストリーマの放電領域にあって、放電

により生ずる電荷により、電極周辺の電界が著しく歪み、単に印加電圧のみを以てしては、放電機構の説明ができない。

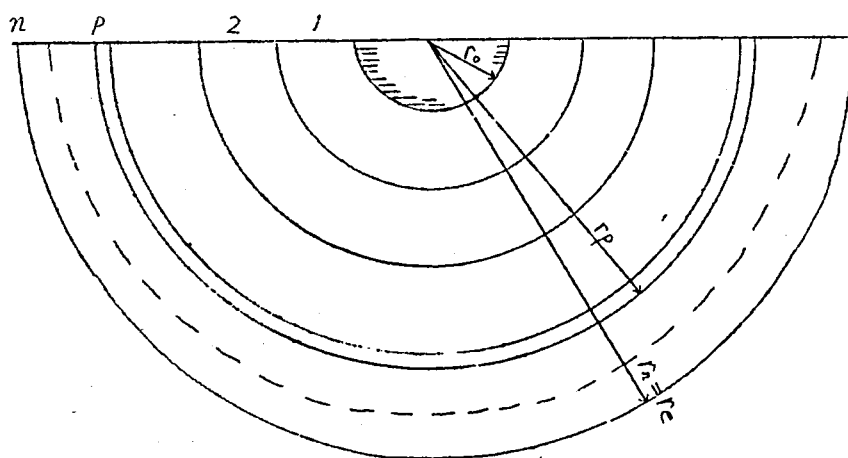
(3) ストリーマの進展は比較的遅く(約 $10\text{cm}/\mu\text{s}$)、ストリーマ放電が式(1-13)に示す大きさまでのびるがうちに、印加電圧は消滅するから静的模型による式(1-14)は必ずしも成立しない。

等の理由があげられる。

一般に(2)が大きく何くものと考えられ、電圧の増加と共に、低減効果は、式(1-14)の計算値よりも大きくなる。

b. 電流値により、土の比抵抗が変化する場合

前項に於いては土中に放電が起らない限り、その接地抵抗は一定と考えたが、式(1-14)において ρ が一定であっても、電流密度がある程度以上増大すると ρ が減少し、低減効果を示すことがある。第1-8図は電流密度と共に固有抵抗が変化するような各種の土が同心的に、且つ殻状に配置されている場合を示す。



第1-8図 各種の物質の殻状配置

このとき、中心よりの距離 r の点においては

$$i = \frac{I_0}{2\pi r^2}$$

但し i : 電流密度

I_0 : 印加電流

第 P 層の比抵抗を ρ_P とすれば

$$\rho_P = f_P(r)$$

中心から r の距離における電界の強さ E_P は

$$E_P = \rho_P \cdot i = \frac{I_0}{2\pi r^2} f_P\left(\frac{I_0}{2\pi r^2}\right)$$

但し $r_{P-1} < r < r_P$

故に内外両電極間の電位差 V_0 は

$$V_0 = \sum_{P=0}^{n-1} \int_{r_P}^{r_{P+1}} \frac{\rho_P I_0}{2\pi r^2} dr$$

従って電極間の抵抗 R_0 は

$$R_0 = \frac{V_0}{I_0} = \frac{1}{2\pi} \sum_{P=0}^{n-1} \int_{r_P}^{r_{P+1}} \frac{f_P(r)}{r^2} dr \quad (1-15)$$

例えば、木炭粉を中心電極の周辺に配置し、その外部に土を満した場合は

$$n = 2$$

また $f_P(r)$ は実験によれば次式で表わされる。

$$\rho_1 = \rho_0 \varepsilon^{-a\sqrt{r}} = \rho_0 \varepsilon^{-a\sqrt{\frac{I_0}{2\pi}} \cdot \frac{1}{r}} \quad (1-16)$$

但し $a > 0$

$$\rho_2 = \text{const}$$

故に

$$R_0 = \frac{1}{2\pi} \left(\int_{r_0}^{r_1} \frac{\rho_0 \varepsilon^{-a\sqrt{\frac{I_0}{2\pi}} \cdot \frac{1}{r}}}{r^2} dr + \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho_2}{r^2} dr \right)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{\rho_o \sqrt{2\pi}}{a \sqrt{I_o}} \left(\epsilon^{-a \sqrt{\frac{I_o}{2\pi}} \cdot \frac{1}{r_i}} - \epsilon^{-a \sqrt{\frac{I_o}{2\pi}} \cdot \frac{1}{r_o}} \right) + \rho_z \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_e} \right) \right\} \quad (1-17)$$

もし後記の如く、土と木炭とを一杯に混合した場合には

$$\rho = f(i) = \frac{b}{i+a} \quad (1-18)$$

これより球状電極の接地抵抗 R_o は

$$R_o = \int_{r_o}^{r_a} \frac{b \, dr}{I_o + 2\pi r^2 a} = \frac{b}{2\pi a k} \left(\tan^{-1} \frac{r_a}{k} - \tan^{-1} \frac{r_o}{k} \right) \quad (1-19)$$

但し r_o : 中心電極半径

r_e : 外部電極半径

$$k^2 = \frac{I_o}{2\pi a}$$

第8章の実験結果に示す如く上式は実際と良く一致する。

第2章 実験装置

§1 衝電圧発生装置

a. 回路定数及び電圧波形

実験に使用する装置及び回路は第2-1図の如くであつて図中の I.G は静電蓄電器 24 箇を有する、直列充電方式の衝電圧発生装置であり、回路定数の主なものを挙げれば、以下の如くである。

静電蓄電器 : $C = 1.0 \mu F$ (1 箇当り) 耐圧 30 kV

充電抵抗 : $R_1, R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ $r = 20 \text{ k}\Omega$

放電抵抗 : $R = 150 \Omega$

インダクタンス : $L = 450 \mu H$

I.G の発生電圧を変化するには、試験用変圧器の一次側の電圧を調整する以外に、蓄電器の直列個数を変化することにより 100~10 kV の間の調節が可能となる。但しこの方法においては、I.G の等価容量 C_0 が変化し、従つて出力電圧波形が変化する。これに対し、一段毎の蓄電器の容量を加減し、且つ、直列インダクタンス L を調節する。

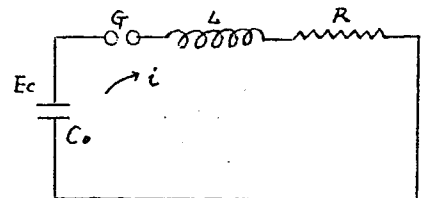
一般に、第2-2図の放電回路に於て放電電流は

$$i = \frac{-E_c}{\sqrt{R^2 - \frac{4L}{C_0}}} e^{-\alpha t} \sinh \beta t \quad (1-19)$$

但し、 i : 放電電流

E_c : 蓄電器 C_0 の充電電圧

C_0 : 放電端より見たる直列蓄電器の容量



第2-2図 I.G の放電回路

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad \beta = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC_0}}$$

上式に於て、 R 及び L を一定に保ち、 C_0 を変化すれば、その波頭長 (T_f) は 2~4 μs で、さ程変化しないが、波尾長 (T_t) は 6~1500 μs の間に変化する。計算により、 T_t を求め等価容量 C_0 との関係を図対数方眼紙に示せば、第2-3図に示す如く、実用的な範囲で直線となり、この場合

$$\log T_t = \log 230 + \log C_0$$

$$T_t = 230 C_0$$

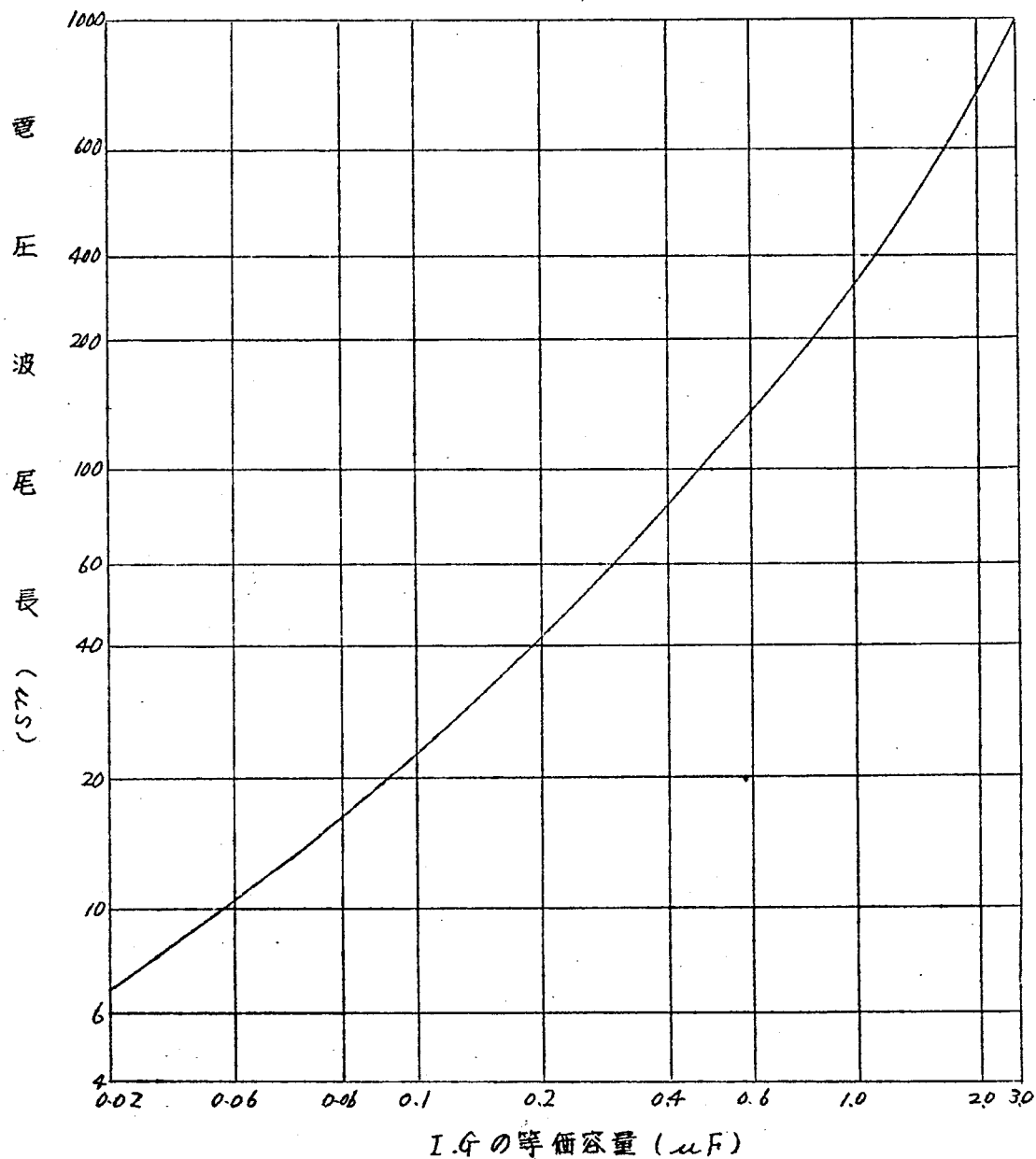
$$(1-20)$$

第2-1圖 實驗裝置及公實驗回路

但し $R=300\Omega$ $L=220\mu H$

となり、比較的簡単にその波尾長を計算することが出来る

本装置に於ける蓄電器の組合せは多数考えられるが、代表的な例を挙げれば第2-1表の如くである。



第2-3図 I.G. の等価容量と波尾長

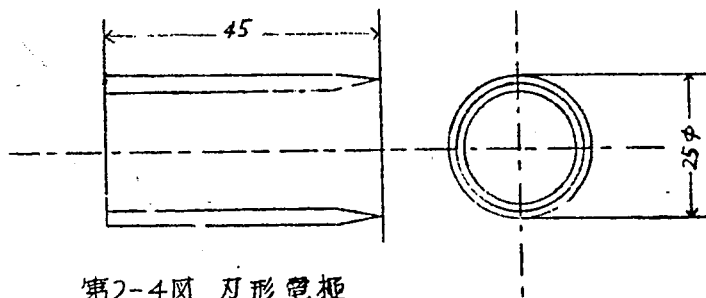
第 2 - 1 表 I.G の構成と波尾長

1 段容量 $C(\mu F)$	段 数	第 1 段容量 $C_0(\mu F)$	波 尾 長 $T_t(\mu S)$	備 考
1.0	24	0.022	5	最高 600keV
2.0	12	0.170	39	
4.0	6	0.670	154	
4.0	3	1.330	306	24個使用 最高 100kV
6.0	4	1.50	550	
6.0	2	3.00	2000	

b. 充 電 方 式 及 び 起 動

ケノトロンの線条加熱用変圧器と試験用変圧器とは独立し、その加熱線条は専用変圧器によって大地と絶縁されているため、任意にケノトロンの接続方向を変えて正負両極性の衝撃電圧を発生させることができる。此の場合、始動用球間隙の接地側電極にある針電極には、対向電極と逆極性の電圧を印加して装置を始動するが、実験によれば負極性の場合には、始動し難くなる傾向がある。

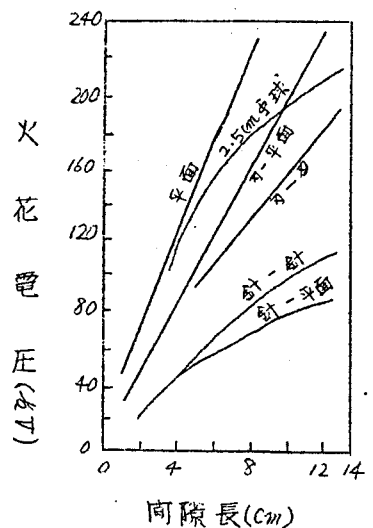
一般に直列充電方式では、充電電圧が低い場合始動が困難となる。⁹⁾これは始動間隙 S.G が閉路した場合に G に現われる衝撃電圧が充電電圧の 2 倍にまでは達しない為と考えられ、本装置においては、充電電圧が 10 keV 以下の場合には始動が極めて困難となる。



第2-4図 刀形電極

これに対しては刃形電極^{(10), (11), (12), (13)}を用いるのが便利である。

これは第2-4図に示す如く、放電端が鋭い刃形をした電極である。この刃形を充分に鋭く仕上げておくと、正のグラニコロナの発生が抑制され、コロナはグローコロナの状態に留まる。このような電極を向い合わせると(或は片方の電極は平板でも良い。)着しい不平等電界を形成しているにも拘わらず、その直流火花電圧は以外に高く、又湿度の影響を受けないという性質がある。第2-5図はその特性を、他の形状の電極と比較したものである。然し刃部に不整部があったり、電極距離が著しく大であったり、衝撃電圧を印加したりすると、上記の性質は失われ、針端間隙の特性に似て来る。即ちこの電極は衝撃比が1よりも小さい。従って第2-1図の間隙 G_1 に、第2-4図の如き電極を使用すれば充電中に誤って放電を開始することなく、また起動のシグナルに対しては確実に動作する。これにより5~10kVの範囲で起動が可能となる。5kV以下では、間隙距離の調節及び陰極線オシログラフとの同期が困難となる。



第2-5図 各種間隙の火花放電特性

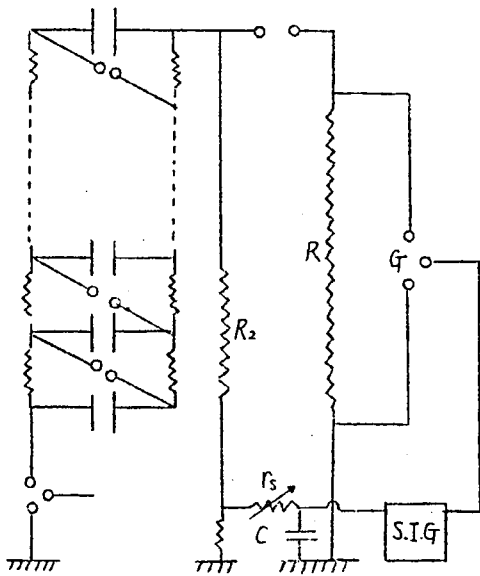
尚、刃形の電極は極めて鋭利な刃を必要とするため、数回の放電で肉眼では見えないうえによりその特性が消滅するのが欠点である。

起動のシグナルは、オシログラフの掃引開始衝撃電圧により補助スターターを介して、I.Gの起動間隙(第2-1図S.G)を放電させる。(次節参照)

C 截断波形用回路

埋設フィルムにより土中ストリーマを観察する際、截断波電圧を印加する必要がある。この際、第2-1図に示すI.Gに更に第2-6図に

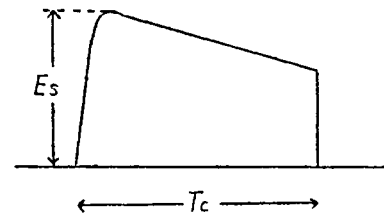
示す如く、 r_s 、 C_s 及びS.I.Gよりなる回路を附加することにより、任意の波尾長を有する截断波を作ることが出来る。即ちI.Gが起動して充電抵抗 R_2 に衝撃電圧が加わると、その一部が r_s 、 C_s による時間遅れを生じて後、補助衝撃電圧発生装置（発生電圧波高値約10kV）を起動させ、その出力電圧が間隙 G を閃絡させるように作り、その結果放電抵抗 R は短絡されて、截断波が発生する。



(a) 截断波発生回路

S.I.G : 補助衝撃電圧発生装置

r_s, C_s : 時間遅れ要素



(b) 截断波のモデル

第2-6図 截断波用回路

間隙 G に用いる球は直径の大なるもの使用し、時間遅れを少くし、且つ閃絡の際の大電流による磨耗を少くする。

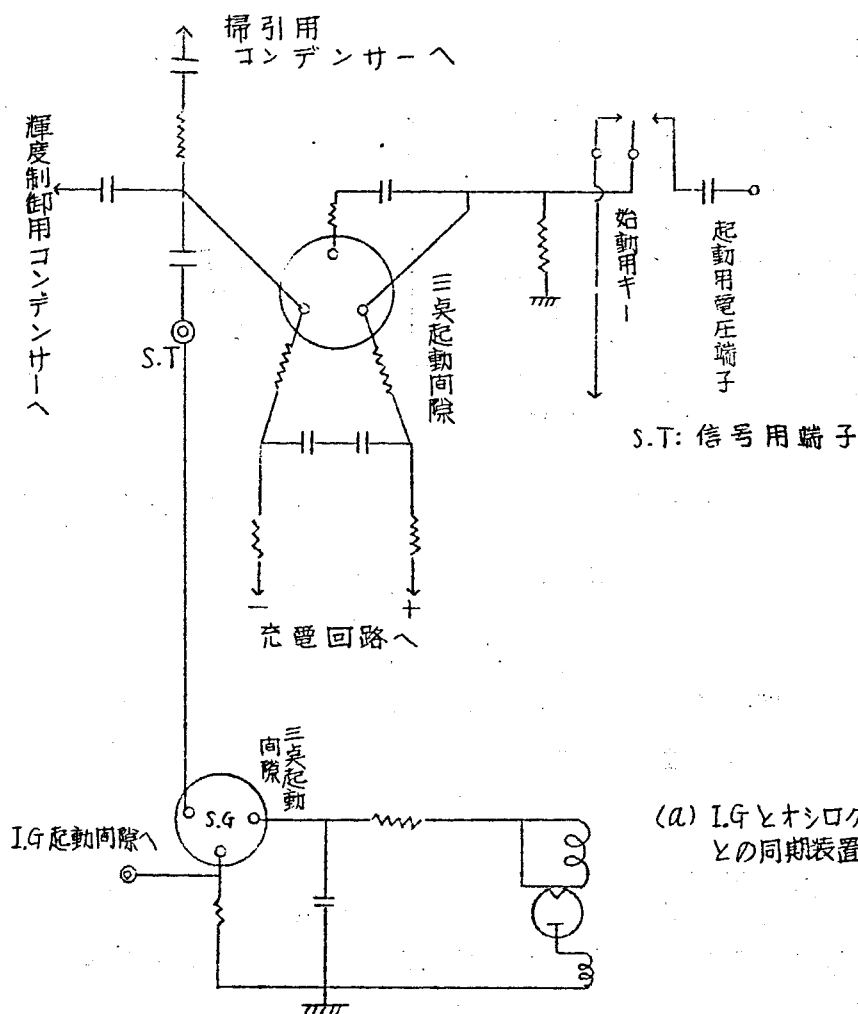
§2. 測定器

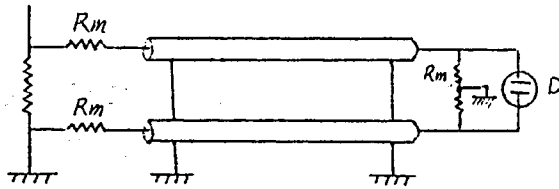
測定器はオシログラフ、分圧器、電流測定用シヤント及び測定ケーブル等よりなる。

a. オシログラフ

オシログラフは、120mm グラウン管 2 個を使用した単掃引＝素子陰極線グラフであって、これにより電圧・電流波形を同時に観測する。又、切換スイッチにより電圧－電流(V-I) 特性をも測定する。

オシログラフの掃引開始と現象との同期方式は種々考えられるが、ここではヤ 2 - ク図に示す如く、オシログラフに内蔵する衝撃電圧発生装置により、オシログラフの掃引と I.G の動作とを同時に開始する如く組立てた。





R_m : 整合抵抗

D : グラウン管の偏向板

(b) 測定用ケーブルの接続方式

第2-7図 測定回路

この方式による同期は比較的安定し、その調整は第2-1図の G_1 または第2-7図の S, G の間隙長を变化することにより行う。

掃引速度は $1 \sim 100 \mu s$ の間を8段階に分けて使用できる。感度はグラウン管上と約 $130 V/cm$ である。

b. 分圧器、及びシマント、測定用ケーブル其の他

分圧器、及びシマントは第2-1図の R 及び資料に直列に接続し、 $60 \sim 0.5 \Omega$ の間を 0.5Ω の段階を以て任意に取ることが出来る。

測定用ケーブルは、ポリエチレンの絶縁をもつ同軸ケーブルであつて波動インピーダンスは 75Ω であり、約 $15 m$ を距てて分圧器又は電流測定用シマント抵抗とオシログラフとを接続する。結線は平衡方式を採用し、その両端には反射を無くするため整合抵抗を置く。

オシログラフの時間校正用としては $100 \mu c$ 及び $1000 \mu c$ の水晶標準発振器を用いる。

§3. 容器及び試料

実験室に於ける接地抵抗の測定のため、近似半球状ポリキ製容器を作り、これに資料土壌を満たし、この中心に電極を置き、容器と中心電極

との間に衝電圧を印加し、その際の電圧電流を測定して、中心電極の接地抵抗を算出する。

実地の接地抵抗は、この様な同心球状の配置に関しては、その容器の半径 r_c が無限大の場合に相当し、前章式(1-12)より

$$R_{of} = \frac{\rho}{2\pi} \frac{1}{r_o}$$

但し R_{of} ; 実地の接地抵抗

r_o ; 中心電極の半径

従って

$$\frac{R_{of} - R_o}{R_{of}} = \frac{r_o}{r_c}$$

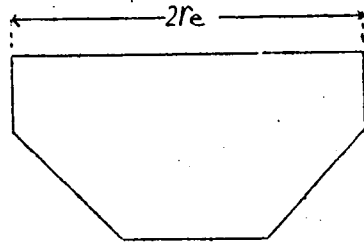
即ちその誤差の比率は、中心電極と外部電極(容器)との半径比であるから、本実験においては $1/40$ 程度となり、最高 $1/20$ である。

このような模擬接地においては、上記の誤差を生ずる欠点はあるが、(1)資料土壌の取り換えが出来る、(2)長期に亘り測定条件を一定に保つことが出来る、(3)室内実験であるから野外におけるよりも容易に且つ精密に実験が出来る、(4)模擬接地全部を暗室内に置くことが出来る等の多くの長所を有し、これより後記の埋設フィルムによる土中ストリーマの直接的観察を可能ならしめるものである。

a. 土の容器

第2-8図に示す如き金属製の近似半球状容器を大小2個(H_1, H_2 と名付ける。)組立て、これを土の容器とした。直径は166及び300cmである。特に前者(H_1)は暗幕を以って覆い、埋設フィルムを使用する実験に備えた。予備実験として H_1 に於て交流(60/s), 100Vに於いて中心電極の半径を種々変化した場合の接地抵抗を測定し、式(1-14)に於ける計算結果と比較すれば、第2-9図の如くであり、両者は良く一致することを示す。

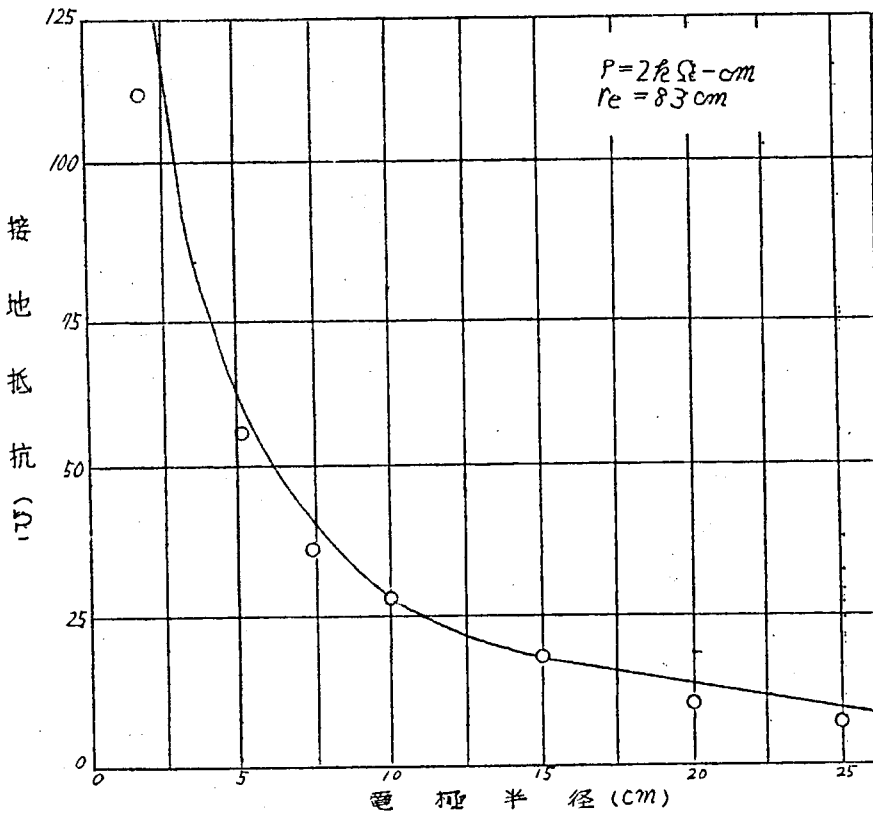
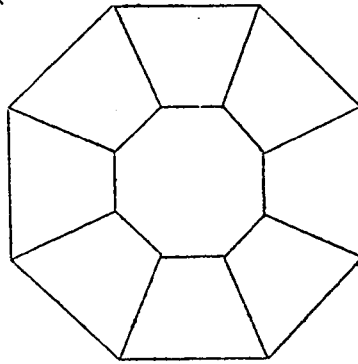
容器は木枠に支持して大地と絶縁し、電流測定用シメントを低圧側に接続することが出来る。



第2-8圖 土壤容器

$$2r_e = 166 \text{ cm} (H_1)$$

$$" = 300 \text{ " } (H_2)$$



第2-9圖 中心電極と接地抵抗

b. 資 料 土 壤

本実験に使用せる土は京大構内及び近郊にて採取した砂及び赤土を 5 mm のふるいを通したものである。特に砂は水で充分洗浄して、水溶性の雜物を除き、精製した。また実験に際し、比抵抗を変える必要がある場合には、砂に対しては水分を添加し、或は逆に日光にさらして乾燥する等、適当な処置を施した。

赤土は所謂混砂粘土であって粒子が特に微細なため、水分を混じると粘土状を呈し、従って比抵抗を变化することは困難であつたので、水分による調整は行なわず、その抵抗特性を变化するためには多量の木炭粉を混じて実験した。これは後記の如く水分による比抵抗の調整とは自ら異なる結果を得ている。

使用した二種の土の中、砂は比抵抗が低く、抵抗の低減効果も顕著で比較的 low voltage にて実験が可能であり、容器としては前記の小型 (H_1) を使用し、逆に赤土は比抵抗が高く、充分な低減効果を得るには高電圧を印加する必要がある。その際の土中ストリーマは長大なものになるので、大型 (H_2) を用いた。

c. 中 心 電 極

前記の如く本実験は、同心球状の電極配置を原則とするものであるから、中心電極は主として黄銅製球状電極を使用し、その直径は 3.5 ~ 15.0 cm の範囲において 5 段階に変化する。また特別な場合として黄銅製環状電極、コンクリート電極或は刺つきの電極を使用した。これはその都度明示することとする。

第3章 土壌の電氣的性質

§1 土 壌 水⁽⁴⁾

土壌は同一種類のものである、その含水量により異った性質を呈する。一般に土壌の粒子は水で包まれており、その吸収や保持の仕方により、下記の如くに分類されている。

- (1) 化合水：化学的に結合して土壌固形分中に存在する水であり、 100°C に加熱するも分離せざるものである。
- (2) 吸湿水：常温に於ける乾燥とは、分離せず、 100°C において初めて可能となる。
- (3) 膨潤水：土壌中の膠質粒子の表面に吸収保持せらるる水分であって、この中に解離したイオンを含む。
- (4) も管水：表面張力により吸収保持され、土壌粒子の水の被膜としては最外部を構成する。
- (5) 重力水、重力により土壌中を容易に移動する。

以上の各種の水分は粒子の表面に連続的に分布し、判然たる境界がなく、また土壌中の空気はこのために飽和している。

§2 土 の 電 導 性

a. 微小電流に対する電気伝導⁽⁵⁾

土壌粒子自体は比抵抗が非常に高く、土の電気電導は主として、土壌粒子により構成されるも管内に於ける現象であり、も管内の土壌溶液のイオン電導と、も管壁と液との界面に生ずる表面電導とに依る。

(1) 土壌溶液のイオン電導

も管内に存在する土壌溶液中に含まれてゐる各種イオン電荷による電気電導はイオンの電気量と移動度、及びイオン濃度により定まるが、これらはまた液温によつて影響される。

ロ) 表面伝導

表面電導は電気浸透電流によるものと界面過剰イオンによるものと
2つに分類される。前者による表面電導度 λ_1 は

$$\lambda_1 = \frac{(\epsilon \xi)^2}{(4\pi)^2 \eta \delta} \quad (3-1)$$

但し ϵ : 液の誘電率

$\delta \xi$: 毛管中の帯電状態により定まる定数

η : 液の粘性係数

また後者による電気伝導 λ_2 は

$$\lambda_2 = V \cdot U \cdot F \cdot \Delta \quad (3-2)$$

但し V : イオン函数

U : イオン移動度

F : ファラデー定数

Δ : 界面の単位面積当りの過剰イオンの量

尚 本節に於ける理論は電流密度が比較的小さくて定常状態において適用される。

6 土の比抵抗の測定結果とその考察

土の比抵抗は、第3-1図に示す如き木箱の両端に $15 \times 4 \text{ cm}$ の黄銅製平板電極を取りつけ、これにA.C. 100 V を加えて測定した。土の資料は 1.5 mm のふるいを通した白砂で、これに適宜水を加えて、その含水率を変数とした。結果は第3-2図の如くであつて、両対数グラフ上で直線となる。これより、

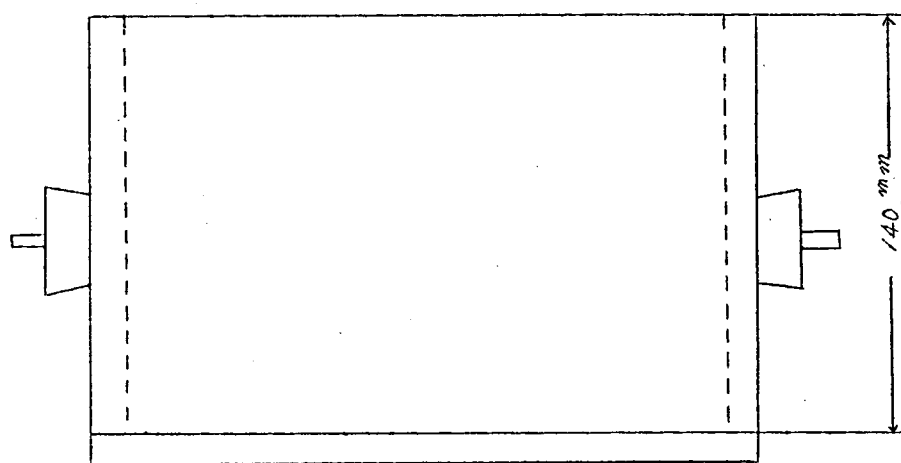
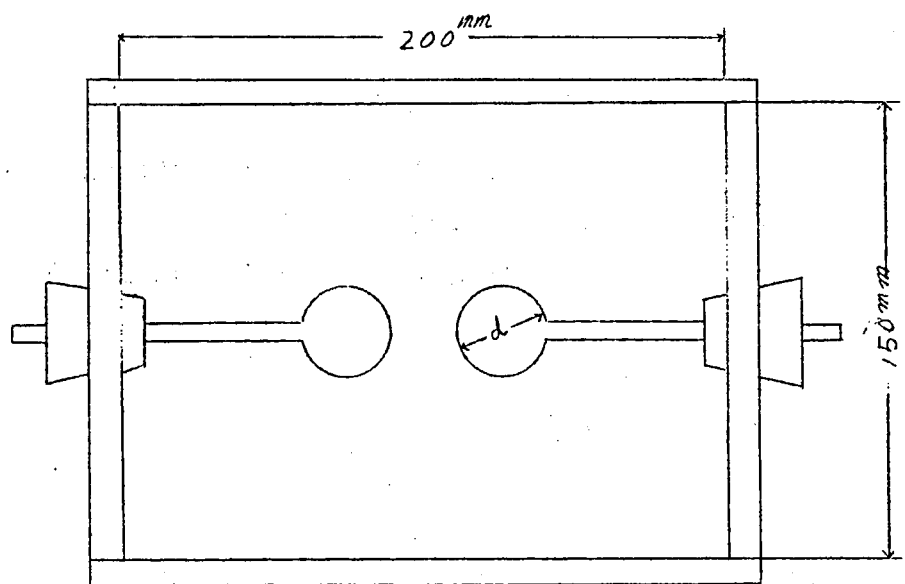
$$\rho = 1.4 W^\alpha \quad (3-3)$$

但し $\rho = \frac{1}{P} (10^{-3} \text{ V-cm}^{-1})$

W : 含水率

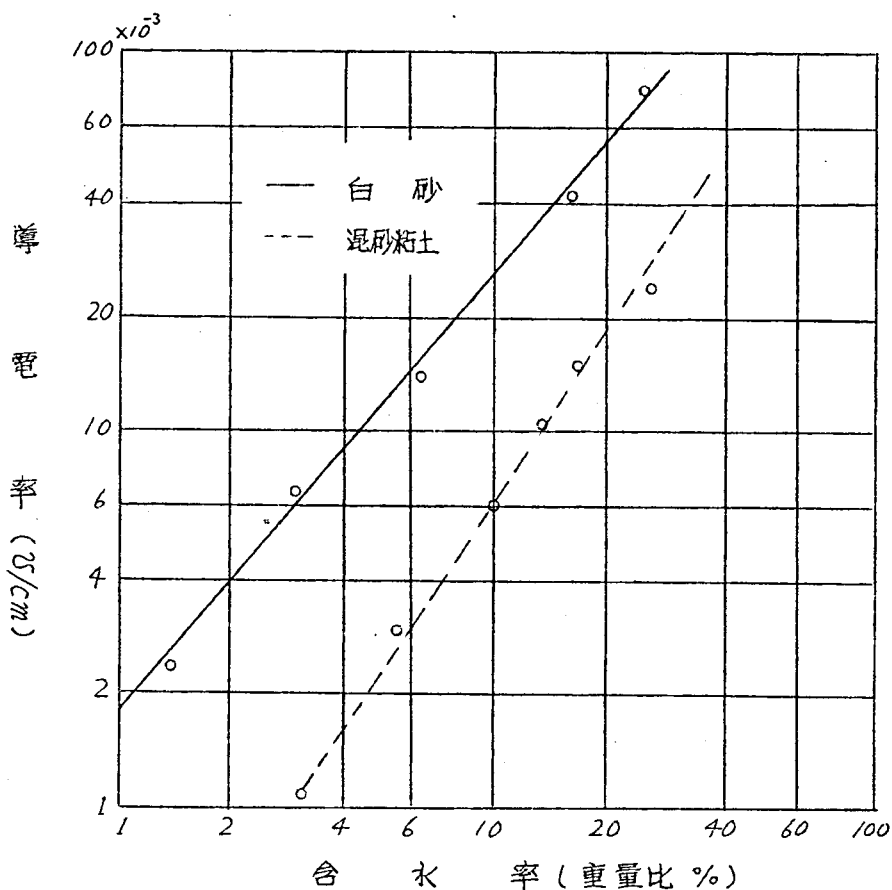
$\alpha = 1.25$

容積の量に比べて溶媒の量が少いときには、溶媒に溶けるのは溶質の極く一部であり、一定条件の下では溶解度は一定で、従つて土壌全体に對



$d = 30 \text{ mm}, 75 \text{ mm}$

第 3 - 1 図 土 壌 の 破 壊 強 度 試 験 装 置



第3-2図 土壤の含水率と比抵抗との関係

するイオン数は含有率に比例し、結局含水率と導電率とは比例する。

しかしイオンが増加すると、イオン間に擾動が働き、イオンに電子が捕えられ、離率は減るので導電性は増加し、更に含水率の増加によりイオンの易動度も増加し、含水率と導電率は式(3-3)の如くなるものと考えられる。αは土の種類、特にその中に含まれる電解質の種類により変化するものと考えられる。

3.3. 土の電氣的服壞

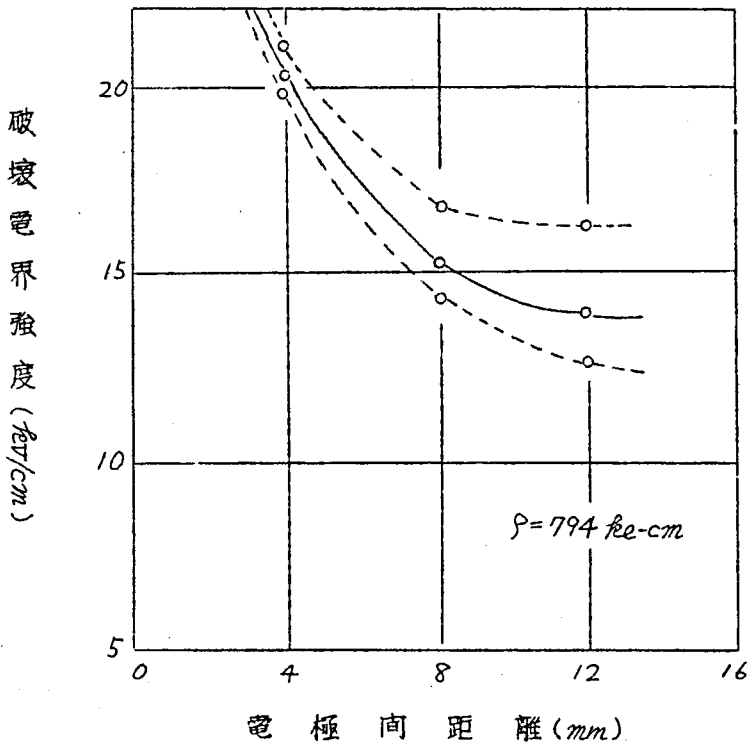
前記の如く衝撃大電流に対する接地抵抗の低減効果は、主として電極

周辺の土の電気的破壊により生ずるから、基礎実験として、土及び水の破壊電位傾度及び火花のおくれを測定する。

a. 土の破壊電圧とその考察

本実験に使用した土は前節の資料と同一の白砂であって、これを第3-1図に示す如き木製の箱に入れ、直径3cmの黄銅製電極を取り付け、衝撃電圧を印加して、その破壊電圧を測定した。この場合、衝撃電圧の波頭を急峻にすれば、公知の如くこの部分は破壊に関与しなくなり⁽⁴⁾、また波尾長 T_t を長くすれば静的波衰強度に近い値が得られる。こゝでは $T_f = 0.5 \mu s$ 、 $T_t = 1000 \mu s$ を使用した。

電極間距離 gd と破壊電界強度 E_B との関係を求めれば第3-3図の如くである。但し V_B を破壊電圧とすれば $E_B = \frac{V_B}{ga}$ であって破壊平均電



第3-3図 電極間距離と破壊強度との関係

界強度である。この場合、取電極を使用しているのを、両電極の中心を結ぶ線上の電界強度 E は均一ではなく

$$E = \frac{V}{4} \frac{d(2g+d)}{gd} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{(gd+d-r)^2} \right) \quad (3-4)$$

但し V : 印加電圧 r : 電極の中心より同極までの距離

gd : 電極間の距離 d : 電極の直径

上式よりこの際の電界強度の最大値 E_{max} 及び最小値 E_{min} を求めると

$$E_{max} = E \left(r = \frac{d}{2} \right)$$

$$E_{min} = E \left\{ r = \frac{1}{2} (d + gd) \right\},$$

実験値より E_{max} , E_{min} を計算すれば第 3-3 図の実線の如くなる。図より明らかな如く、 gd が増大すれば E_B は減少する。

この現象を考察するのに、砂は水と空気とを含み、破壊に関与するのはこの二つであるとし、また Von Hippel の考え^{(17), (18)} を採用すれば気体と同様に計算できる。即ち電子が電界 E によりエネルギー ε を得る個数 dN はポアソン分布により

$$dN = \frac{N_0}{\lambda} \exp \left(\frac{-\varepsilon}{eE\lambda} \right) \quad (3-5)$$

但し λ : 平均自由行程

e : 電子の電荷

N_0 : 電子全個数

従って ε 以上のエネルギーを得る確率 P は

$$P = \exp \left(\frac{-\varepsilon}{eE\lambda} \right)$$

尚、 λ は水と空気だけに因するものである。

この水と空気の混合体と同じ破壊電圧をもつ他の均質な物質の電離エネルギーを ε とすれば、気体の電離係数に相当する α の逆数は

$$\frac{1}{\alpha} = \lambda \exp \left(\frac{\varepsilon}{eE\lambda} \right) \quad (3-6)$$

破壊の条件として、電子はたれの先端の電子の数が或る数 N より多く

なるものとする

$$\alpha g d \geq \ln N = n \quad (3-7)$$

尚、この際、 γ 作用と空間電荷とを無視するものである。式(3-6)、(3-7)より

$$\frac{1}{E} = \frac{e\lambda}{E} \ln\left(\frac{gd}{n\lambda}\right) \quad (3-8)$$

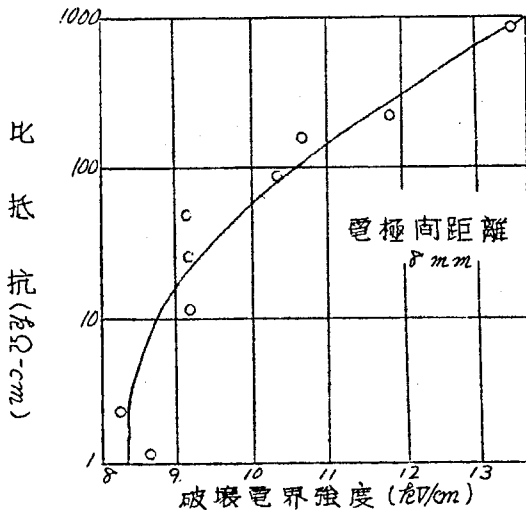
第3-3図に示す実験結果を $\frac{1}{E}$ と $\ln gd$ とを変数として画けば、第3-4図の曲線(1)の如くであって、直線にはならない。これは砂の部分に電子の運動エネルギー損失に關与しないとした為に生じた誤差であるとして、これを補うに必要な一定電界 E' を附加するものとするれば、式(3-8)は

$$\frac{1}{E-E'} = \frac{e\lambda}{E} \ln\left(\frac{gd}{n\lambda}\right) \quad (3-9)$$

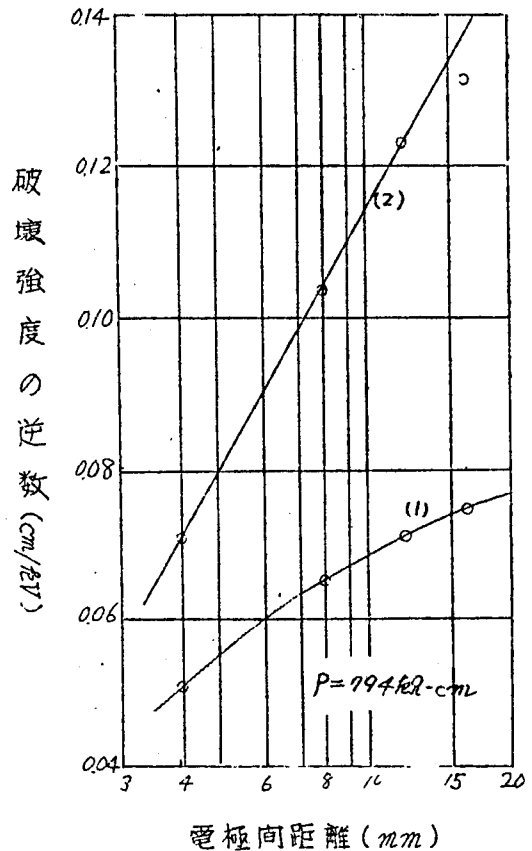
実験結果より

$$E' = 6.0 \text{ kV/cm}$$

を得る。式(3-9)を第3-4図直線(2)として示す。



第3-5図 土壌の比抵抗と破壊強度との関係



第3-4図 電極間隙と破壊強度との関係

また、土の比抵抗(ρ)と破壊電圧傾度(E_B)との実験結果は第3-5図の如く、 ρ の増加と共に E_B は増加する。

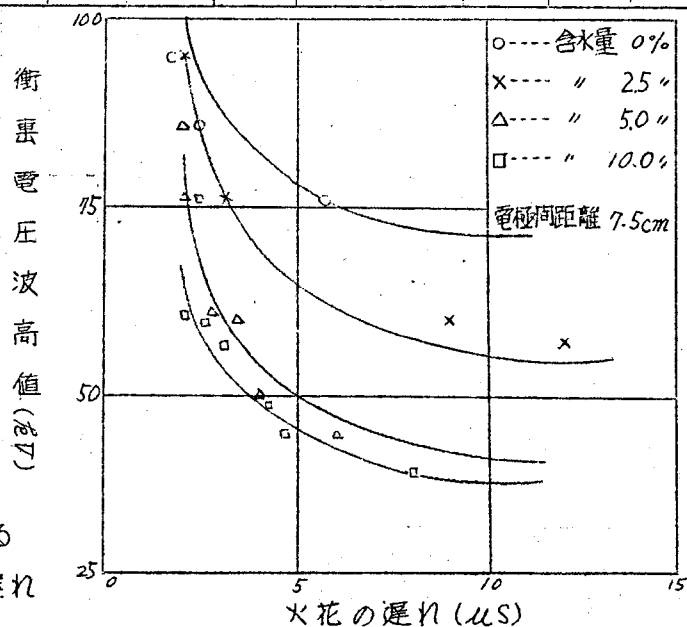
b. 火花のおくれ

本実験に使用した土は前項に記せる白砂であつて、これを第3-1図に示す如き木製の木箱に入れ、直径(d)7.5cmの黄銅製球電極を5cmの間隙に保ち砂中に埋め、印加する衝撃電圧($1 \times 40 \mu s$)の波高値と火花のおくれとの関係を求めた。パラメータとしての土の含水量を変化した。含水量は $100^\circ C$ にて乾燥せるものを0%とし、その後、これに順次水を加えて、土と水との重量比の百分率を以て、含水率とする。

測定結果は第3-2表及び第3-6図の如くである。

第3-2表 土の火花の遅れ(μs)

印加電圧 含水量(%)	96	86	76	71	66	60	57	50	45	40
0	1.8	2.4	5.7	—	—	—	—	—	—	—
2.5	2.0	—	3.0	3.4	—	9.0	12.0	10.0	—	—
5.0	—	2.0	2.0	—	2.7	3.4	—	4.0	6.0	—
10.0	—	—	2.0	—	2.1	2.5	3.0	4.0	4.5	8.0



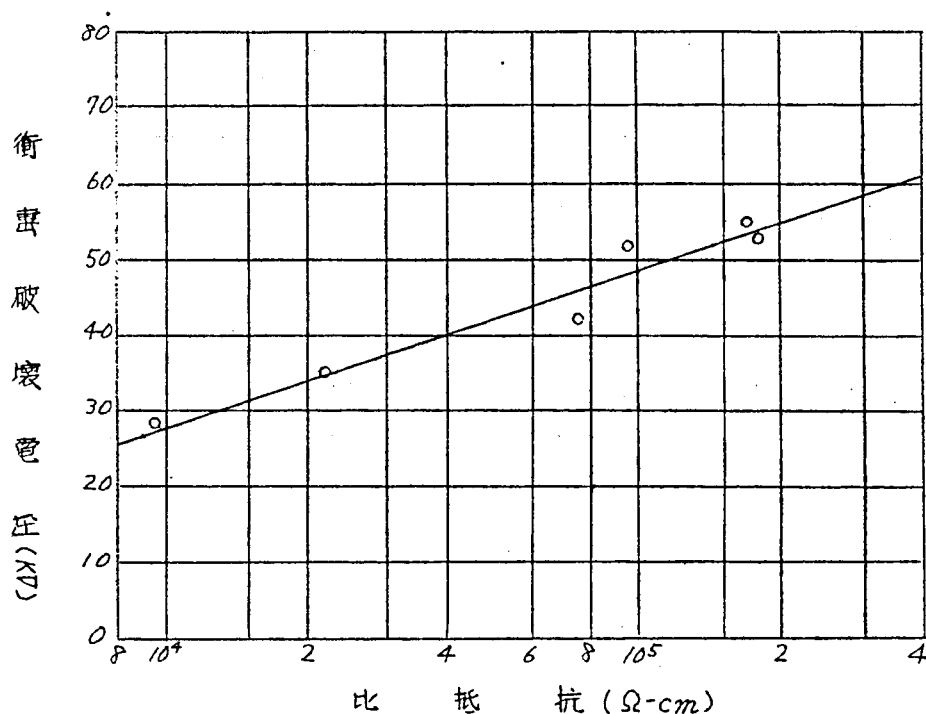
第3-6図 土に於ける
火花の遅れ

§4. 水の破壊電圧¹⁹⁾

土中の水分が土の電氣的破壊に及ぼす影響は前項の如くであるが、これに関連して、水の電氣的破壊特性を検討する。

向隙用の電極及び容器は第3-1図に準するが、この場合容器はペークライト製を用い、球の直径(d) 2.0cm 、向隙距離(gd)は 0.3cm 、水温は 21°C である。試料としての水は、市販の蒸溜水($P \approx 2 \times 10^5 \Omega\text{-cm}$)、上水($P \approx 2 \times 10^4 \Omega\text{-cm}$)、これらの混合水、及び井戸水、或は硫酸銅の上水溶液($P < 10^4 \Omega\text{-cm}$)を採用した。但し比抵抗(P)は 60% の交流 100V で測定した。

比抵抗の変化に対する衝撃破壊電圧の波高値(V)の測定結果は第3-7図の如くであって、半対数方眼紙上で直線となる。



第3-7図 水の比抵抗と破壊電圧

即ち

$$V_s = a + b \log_{10} f \quad (3-3)$$

但し $a = 54.7 (\pm 5.6)$

$b = 20.6 (\pm 1.2)$

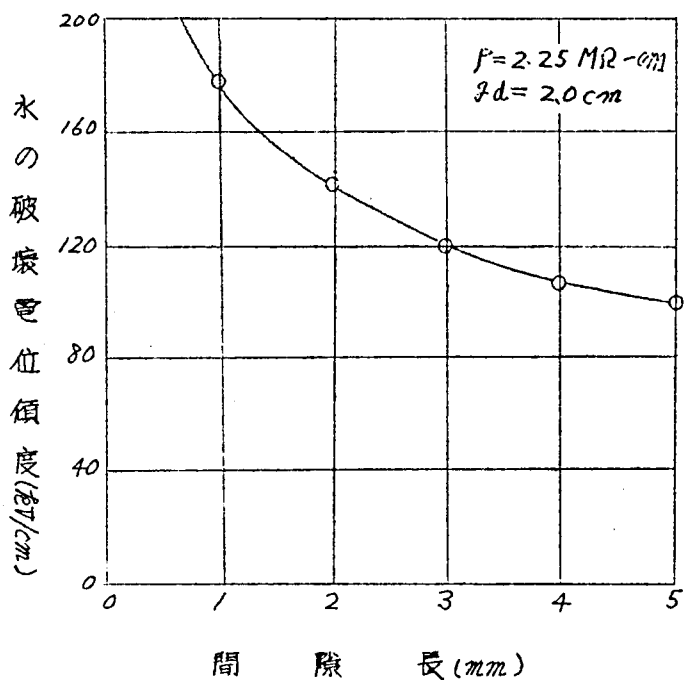
又、この測定範囲では放電の前後における比抵抗の値に変化は認められなかった。

第3-8図は間隙距離 (gd) の影響を検討した実験結果であって比抵抗が $2.25 \text{ M}\Omega\text{-cm}$ の水を使用し、第3-7図の場合と同じ条件のもとに、但し gd を $1 \sim 5 \text{ mm}$ の変化し、衝撃破壊電位傾度 (V) を測定したものである。これより明らかな如く、 V は gd と共に直線的に変化せず、 $X_s = V/gd$ とすれば、 X_s は gd の増加と共に減少し、 gd が 1 mm より小なる範囲では X_s の値が約 $18 (\text{kV/cm})$ となるのに対して gd が 5 mm 附近になると X_s はほぼ半減して約 $10 (\text{kV/cm})$ となる。第3-3表は第3-8図の実験結果によりこの関係を示すものである。

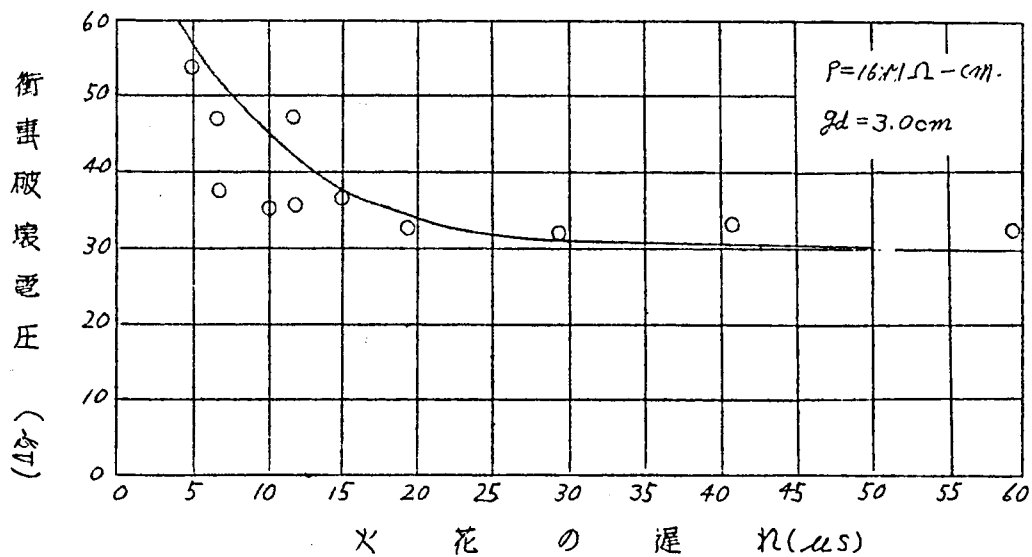
第3-3表 間隙長と水の破壊電位傾度 $f = 2.25 \text{ M}\Omega\text{-cm}$

間隙距離 (mm)	1	2	3	4	5
電位傾度 (kV/cm)	175	140	120	110	100

更に水の絶縁破壊電圧と火花の遅れとの関係を示せば、第3-9図の如くである。但し電極の直径は 30 mm 、水の比抵抗は $16 \text{ M}\Omega\text{-cm}$ である。これより明らかな如く、水に於ける火花の遅れは比較的大きい。



第3-8図 間隙長と水の破壊電位傾度



第3-9図 水中における火花の遅れ

第四章 土中ストリーマの観察

§1. 概 説

衝撃電圧による絶縁物の破壊は、一般に過電圧印加の状態であり、特に高気圧、大間隙距離の条件下では、ストリーマ理論がこれを説明するものとされている。即ち印加電圧により生じた電子はだれがその背後に正イオンによる空間電荷を生じ、この電荷による電界の歪みがその附近の電離作用を強化し、また正イオン空間中にはだれ込む電子群は導電性のプラスマ即ちストリーマを生じ、この過程が進行して、両電極間を橋渡しするために、その間の全路破壊が生ずる。⁸⁾

この理論の端緒となった *H. Raether* の観察²⁰⁾ においては、ストリーマは紡錘状を為すことが認められている。

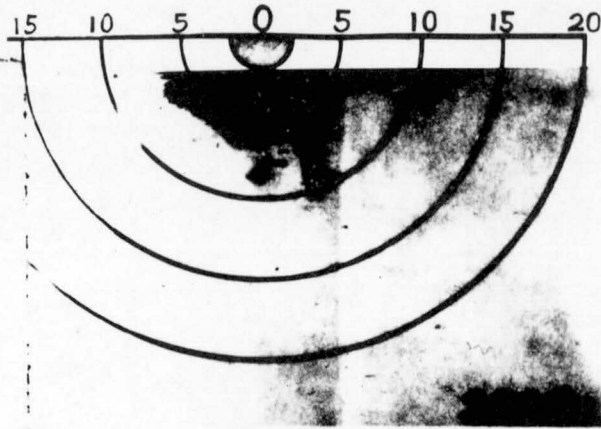
しかしこれらは、何れも気体中に於けるものである。土中に於ける観察は未だなされてはいない。僅かに *Petropoulos* が、土中ストリーマを同心球状と仮定して、接地抵抗の低減効果よりその大きさ、進展速度等を逆算している。

また、実際の接地においては、接地電極の対電極は無限大の奥にあり、ストリーマが両電極間を橋渡しすることではなく、途中で消滅する。たとえ電極間距離が短い場合でもストリーマの進展速度は比較的小さいから、その表面より印加電圧を排流しつつ、印加電界の消滅と共に途中で消滅することが多い。

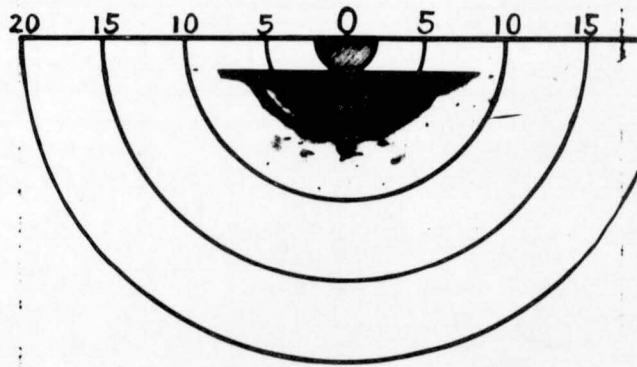
本実験に於ては、模擬接地に於ける土の比抵抗、破壊電圧、印加電圧等の諸種の要因を考慮して、土中ストリーマが外部電極（容器）に届くことなく、且つその接地抵抗の等価半径が外部電極に比し、比較的小さい（最大 $\frac{1}{2}$ ）範囲を遡らせいる。

§2. 土中ストリーマの形状^{21), 22)}

土中ストリーマは、極めて短時間に生成消滅し、且つ不透明な土中で発生するものであるから、これを精密に観察することは極めて困難で

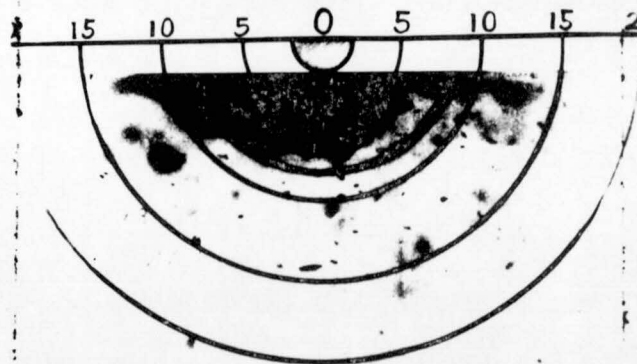


(a)



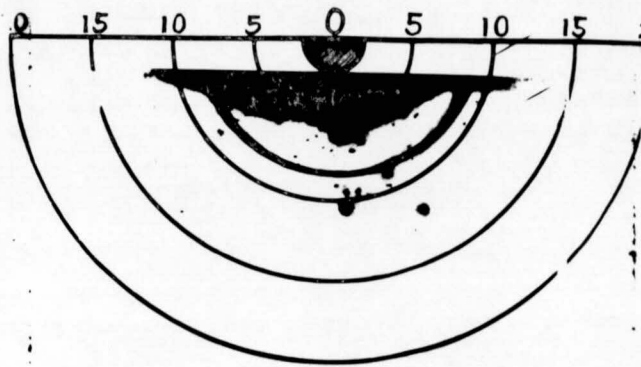
$\times 0.1$
630A

(b)



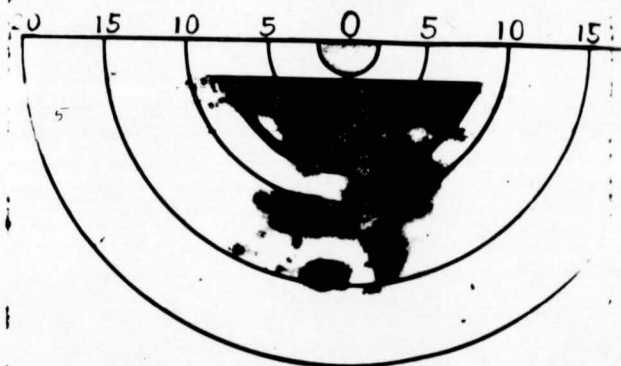
1080A

(c)



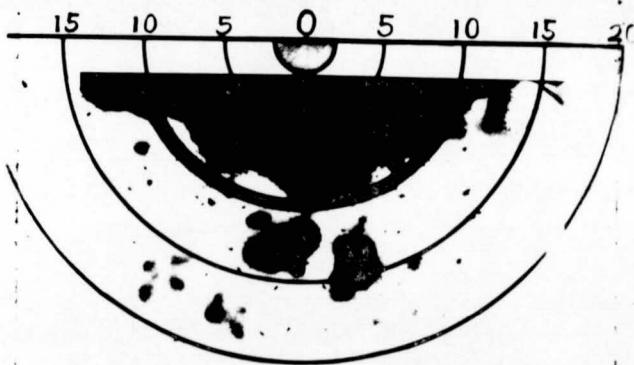
1130A

(d)



12110A

(e)



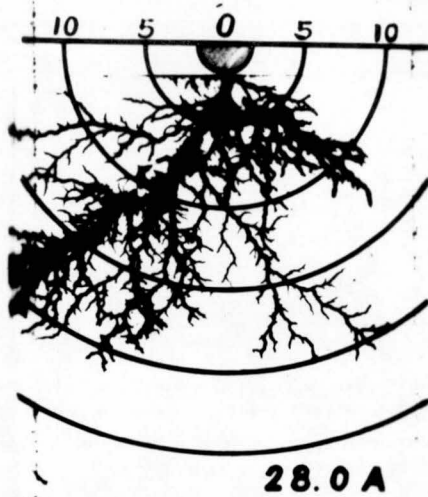
1680A

(f)

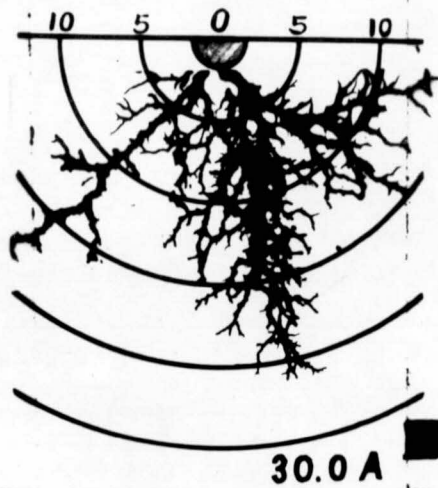
オ4-2図

土中ストリーマ像 (其ノ一) (続き)

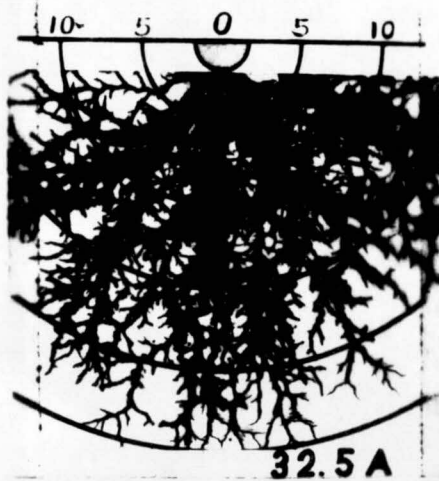
$\rho = 2 \text{ K}\Omega - \text{cm}$



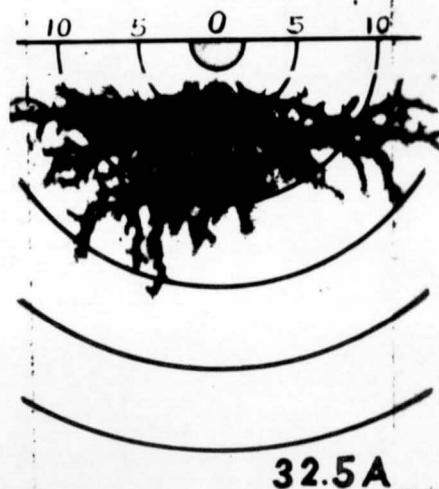
(a)



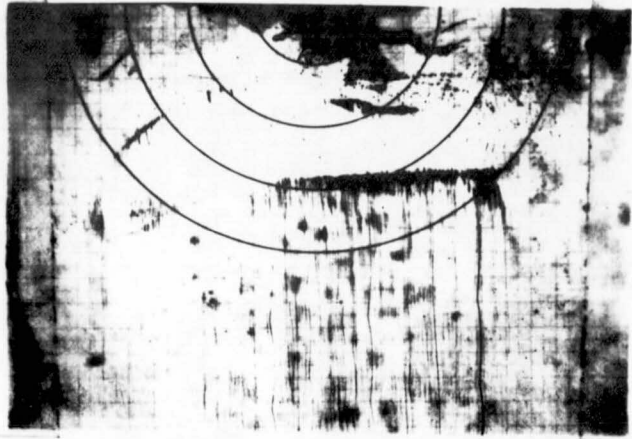
(b)



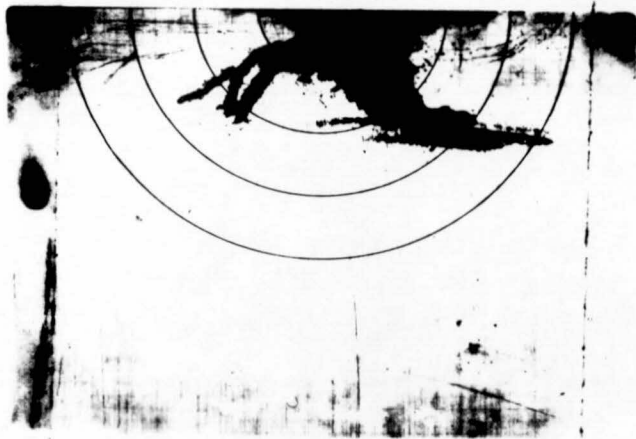
(c)



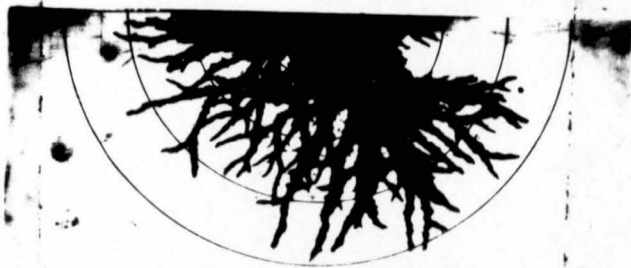
(d)



(a) $T_t = 110 \mu s$



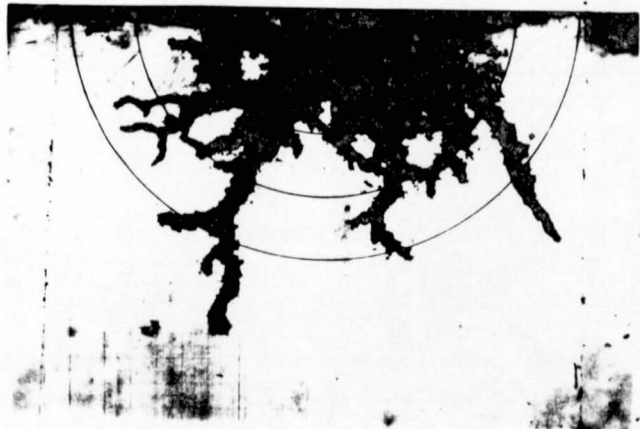
(b) $T_t = 250 \mu s$



(c) $T_t = 300 \mu s$



(d) $T_t = 310 \mu s$

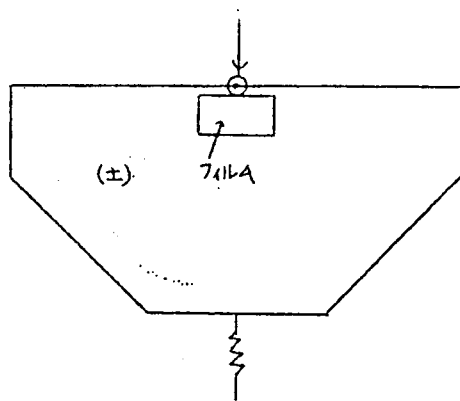


(e) $T_t = 400 \mu s$

オ 4 - 4 図 波尾長と土中ストリーマ像 (続き)

$\rho = 10 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$

ある。こゝでは第4-1図に示す如く
 接地電極の直下にX線直接撮影用フ
 ィルムを垂直に埋設し、接地電極と
 外部電極との間に $1 \times 40 \mu\text{s}$ の衝
 突電圧を印加して、土中ストリーマ像
 を得、更に、土の比抵抗 (ρ)、印加電
 圧波高値及び接地電極の形状や大き
 さを変化して、土中ストリーマの形
 状と大きさの変化を検討したものと
 する。



第4-1図 埋設フィルムの配置

a. 土の比抵抗との関係

中心電極の直径 (ϕ) が 4cm と電圧波高値が $25 \sim 60 \text{ kV}$ である場合の土
 中ストリーマ像は $\rho = 2 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ の場合、第4-2図に示す如くであって
 Petropoulos が仮定した如く近似半球状をなしている。一方 オシログ
 ラフにより電圧電流を測定し、その最低抵抗 R_{\min} 及びこれに対応する
 等価半径 r を求めて第4-1表に示す。

第4-1表 衝突電流に対する球状電極の接地抵抗 $\rho = 2 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$

$E_m (\text{kV})$	$I_m (\text{A})$	$E_m / I_m (\Omega)$	$R_{\min} (\Omega)$	$r (\text{cm})$	$g_0 (\text{V/cm})$
26.8	39.2	68.1	59.6	5.0	4950
32.6	63.2	51.5	46.1	6.4	4980
39.8	113.3	35.3	30.0	9.3	4170
43.4	121.0	35.7	30.2	9.2	4550
56.5	167.9	33.8	29.5	10.0	5340

但し、 g_0 はこの土の固有破壊電位傾度であってストリーマの発生が球
 状である場合には

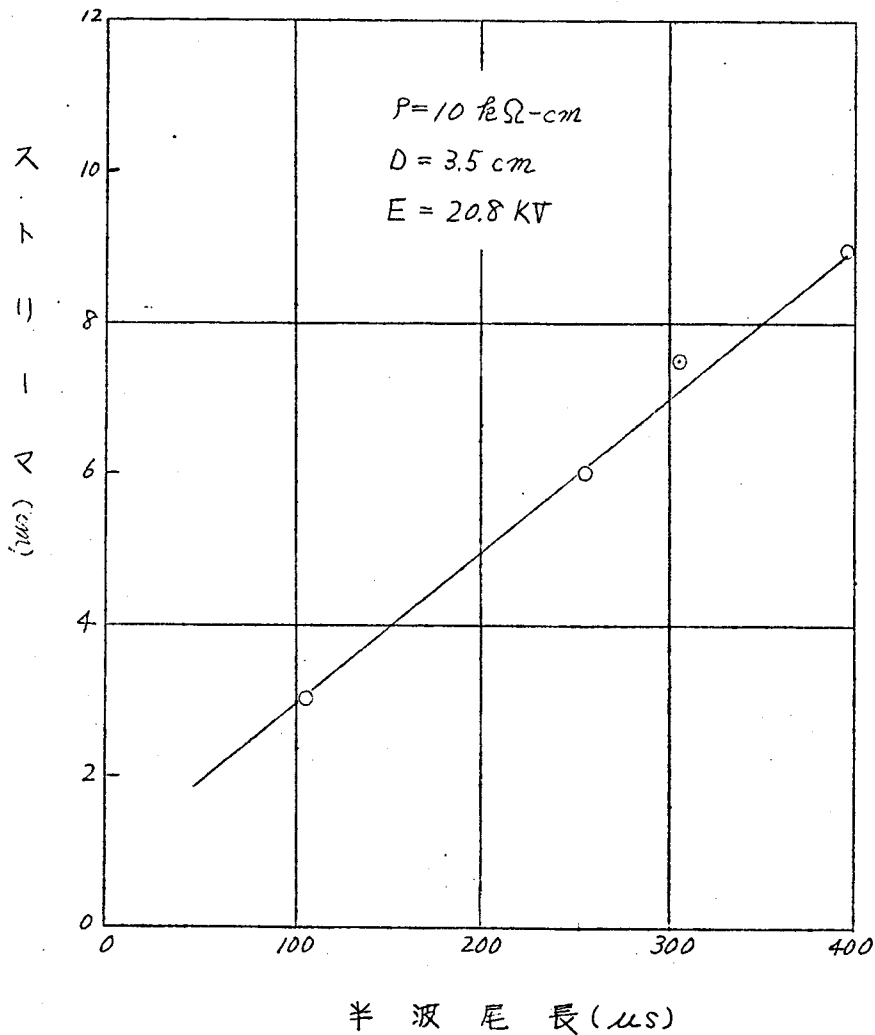
$$g_0 = \frac{I_m \rho}{2\pi r^2} \quad (4-1)$$

但し I_m : 電流波高値

ρ : 土の比抵抗

r : ストリーマの最大半径

第4-1表に依れば、 g_0 は多少ばらついてはいるが、これより $5\mu/cm$ と見做せば、表中の r と、4-2図に示すストリーマ像の半径とはほぼ一致する。又表中の E_m/I_m は電圧波高値を電流波高値を除した値であって所謂見かけ上の接地抵抗で²³⁾ 接地抵抗としてはこれを採用することが



第4-5図 波尾長とストリーマの大きさ

多い。一般に電流の最大値は電圧の最大値より遅れて現われるから、見かけ上の接地抵抗は最小抵抗値よりも大きい値を示す。

同様にして土の比抵抗が $30\beta\Omega\text{-cm}$ の場合につき、土中ストリーマを撮影した結果は第4-3図に示す如くである。これより明らかなる如く、比抵抗が高くなるとストリーマの形状、大きさと共に著しく変化し、接地抵抗の等価半径と写真上のストリーマ像の半径との対応は失われる。尚、印加電圧が同図(d)の負極性の場合には、像の長さは正極性の場合に較べて短いが、その接地抵抗の低減効果は両者とも変わらない。尚、同図(a)、(b)は電圧印加回数は5回、(c)、(d)は15回である。

6. 印加電圧の波尾長との関係

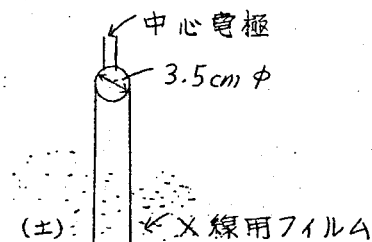
前項の実験は印加電圧の波形を標準波形($1\times 40\mu\text{s}$)としたが、IGの出力端子より見た等価容量C。(第2-1表参照)によりその波尾長を変化すると、その際の接地抵抗の最低値 R_{min} は波尾長の増加と共に減少する。これに対応する土中ストリーマ像を埋設フィルムにより求めれば第4-4図の如くである。同図における同心円は2.5cm毎の目盛りである。これよりストリーマの長さ ℓ_s と T_t との関係を図示すれば第4-5図の如く、両者は大体比例関係にあることが判る。しかしこの直線の傾斜は印加電圧の波高値の函数であって一般に電圧の上昇に従い、その傾斜は少くなり、後記の如く、印加電圧 $50\beta\text{V}$ 以上では R_{min} は T_t とは無関係にほぼ一定となるところから見れば、ストリーマは高速となり、電圧の波頭部分において、その波高値によってきまる大きさまで進展し、その後波尾においては進展せず波尾長には無関係になるためと考えられる。

C. 実験方法の検討と実験結果の考察

本節A項に記した実験においては、その接地抵抗に対する等価半径とフィルム面上に得た半球状のストリーマ像とが一致するところから、この像は土中ストリーマの形をほぼ正確に写していることが考えられる。しかしB項に示す如く、その像が樹枝状を為す場合には、この像が埋設フィルム上の沿面コロナ放電による疑いがある。これに対し――

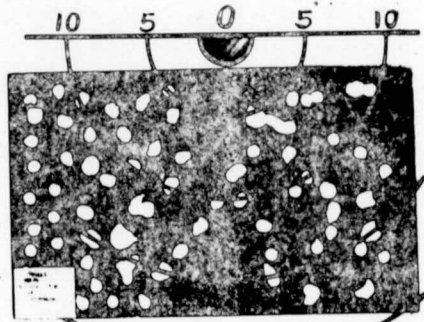
- (1) 第4-6図に示す如く、フィルムに直径7~10mmの円い孔²²を無数にあけて、これを埋設フィルムとして用いると、ストリーマ像がこの穴をとび越えて進展しており、孔の外縁に沿って迂回することはない。またフィルムを電極より5~10cm離して深く埋めても同様の像が得られる。これは同様の形をした土中ストリーマがフィルムの存在とは無関係に進展していると考えてよい。
- (2) フィルムが存在するために、土中ストリーマの進展方向が変わることは避けられないが、フィルムは対称面内にあるので大きな影響はない。フィルムを土中に埋めた時と埋めない時との電流電圧特性には、特に差異はみとめられない。
- (3) 写真上のストリーマ像が途中で一部分消えてしまつて、像が不連続になることが屢々である。これは、放電路はフィルム面から離れた土中にあり、この樹枝状の放電は立体的なものであると考えられる。
- 4) 後記の碗状の中間補助電極を使用して測定したストリーマの到達距離と写真上の長さを比較すれば、正極性の衝撃電圧を印加した場合、その放電像の長さはストリーマの到達距離よりも多少大きい。負極性の場合、逆に短い。これより正極性の場合のストリーマ像は、実際のものより多少長い目に、負極性の場合、短く現われるものと考えられる。特に後者の場合は、4-7図に示す如く、二枚のフィルムにてストリーマを拘束する如く配置して初めてストリーマ像が得られる。

尚、誘電体の表面が、その電界に平行になるように平等電界中に置かれるときは、正電極附近では誘導体表面方向の電位傾度が最も大となり、負電極附近では任意の方向に対し、殆んど変化が無いことが明らかにされており、²⁵⁾これよりすれば正極性の衝撃電圧印加の場合にはフィ

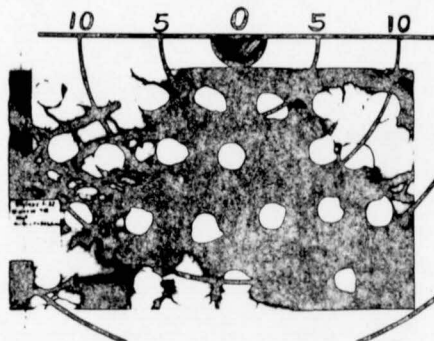


第4-7図

負極性ストリーマの拘束



(a)



(b)

図 4-6 穿孔フィルム

$\phi = 30 \text{ } \mu\text{m}$

フィルム方向にストリーマが最も進展し易くなるのに対し、負極性の電圧印加の場合は、たとえストリーマが最初フィルム面に沿って進展しても、任意の面で容易にフィルム面より離れるものと考えられる。従って、正極性の場合には一種の沿面放電の形状をとっている事となるが、(1)、(2)及び(3)に記した事実より考えると、土中の放電状態を著しく変えるものではなく、ストリーマがフィルム面に沿って伸び易くなる以外には、大きな変化はもたらさないと言える。

- (5) フィルムによる影響としては、フィルムの縁が英々と黒くなっていること、及びフィルム面上で樹枝状ストリーマがフィルム端に到達した場合、そこで一部が反射されストリーマが逆向きに伸びていることがある、等が掲げられる。しかしこれらは局部的な現象であって、特に問題とするに足りない。
- (6) 衝撃電圧の印加を反覆するにつれて、正、負両極性及びフィルムの存否に拘わらず、接地抵抗の低減効果は僅かに増加する。これは電圧の印加を重ねるに従って、土中ストリーマの伸び易い条件が作られる為であろう。従って一枚のフィルムに電圧を15回印加したときの像は、1回印加した時の像の15倍以上となる。

d. 透明固体絶縁物の破壊

透明な絶縁物を亘つ土壌の様な性質を示す物質があれば、土中放電の状態を知る一つの手懸りとなる。これに関し、次の如き例がある。

- (1) 寒天による実験²⁶⁾ 寒天の中に予め食塩又は硫酸ナトリウムの如きものを溶解し、同時にフェノールフタレインの如き指示薬を入れ、亘つ中性の状態にして凝固させる。次に予め挿入して置いた針対針電極に衝撃電圧を加えると、陽極の周囲並ひに陽極の先端より可成りの距離まで赤色となり、これが電離の範囲を示すものである。この杯に陽極の周囲を著しい電離を示すことは、空気中に於いて正極性コロナが発達し易いことと軌を一にしている。
- (2) ガラスによる実験²⁷⁾ 針対平板電極を用い、油中で硝子に衝撃

電圧を印加する時、電圧が破壊電圧に達すると、音をたてて放射状に割れる。これは印加電圧波形により異なり、割目とはらばいで、局部的破壊のままにとめる事が出来る。電圧印加が一回だけの場合は正、負両極性とも線状ストリーマが放射状に生じ、正負の区別はつき難いが、繰返して印加した場合には正極性の時にはストリーマ数が増すだけで、負極性では電圧印加回数と共に破壊の痕跡が伸長すると言う差異を生ずる。

これらの実験は針状電極を用い、供試物は空隙のない密な物質であるので、空隙の多い土壌に対しそのまま適用することは出来ないが、晴天の場合の如く、比抵抗の低い場合には電極周辺で一様に電離が起るのに対し、ガラスの場合の如く、比抵抗の高い場合には線状の破壊を示すと言う事は、埋設フィルム上のストリーマ像と似ている。

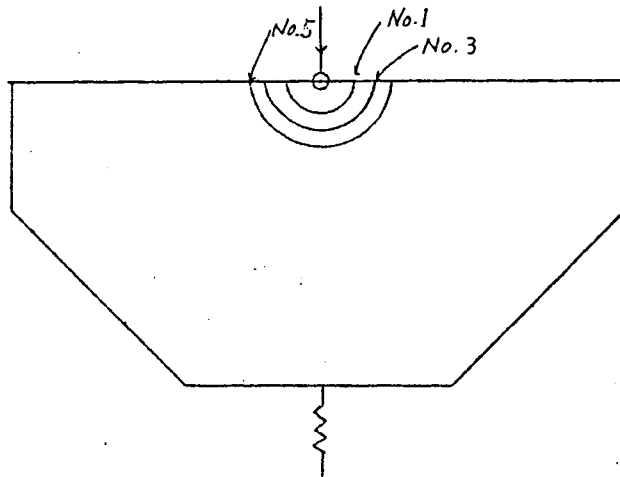
c. 比抵抗の変化とストリーマの形状との関係

上記の如く、土の比抵抗(P)が2を及び30を $\Omega\text{-cm}$ の場合のストリーマ形状の観察の結果より明らかなる如く、ストリーマの形状は条件に従い種々変化する。例えば $P \approx 2.5 \Omega\text{-cm}$ 附近では円形の像と共に樹枝状の像が屢々現われ、更に比抵抗がそれ以上になると、樹枝状の像が得られるようになる。樹枝状のストリーマの長さは、接地抵抗の球状等価半径とは当然一致しない。而して、これらは何れも土中ストリーマの状態を表わすと考えて良く、円形の像は特殊な場合であって、一般には樹枝状と考えるのが妥当である。これらの結論を裏づけるものとしては、上記の各種の実験結果の他に *fulgurite* を挙げる事ができる。これは乾燥した砂地における落雷の痕跡たる孔又は硝子杯物質であって、直径約 $1/2$ 吋、長さ数呎に達し、この形状は、埋設フィルムによるストリーマ像と類似したものである。

§3. 土中ストリーマの到達距離

第4-8(a)図に示す如く、中空半球(碗)状の黄銅製補助電極を中心電極

と同心的に配置し、その間隙には土を満ちし、中心電極に衝電圧を印加する時は、第4-8(b)図に示す如く中心電極より発生する土中ストリーマが各補助電極（図では No.1, No.3, No.5）に到達する毎に電流波形の不連続的飛躍が起る。²⁹⁾ 特に土の比抵抗が大きい程電流の飛躍は大き



第4-8(d) 図 碗状中間補助電極の配置

く、逆に土の比抵抗が小さい程電圧の減少が目立つ。本実験に用いる中間電極の大きさは次表の如くである。

第4-2表 中間補助電極の大きさ

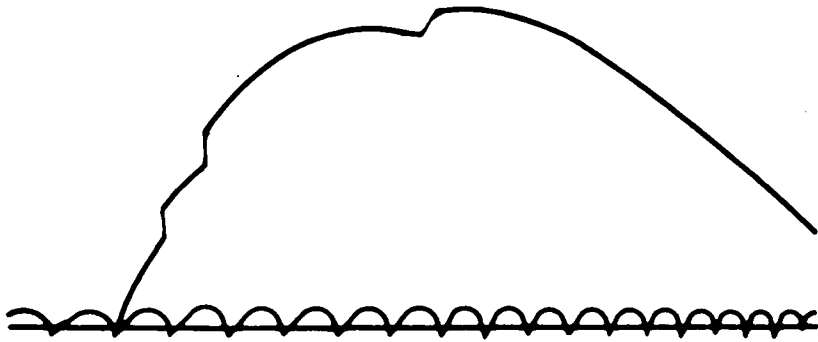
名 称	直 径 (cm)	備 考
No. 1	2 0	厚さ 1mm, 黄銅製
" 2	2 5	
" 3	3 0	"
" 4	3 5	"
" 5	4 0	"
" 6	6 0	厚さ 1mm, トタン製
" 7	8 0	"

これらの電極の中、電圧に応じて任意の一つを選んで配置し、中心電極に印加する電圧を順次増大させながら電流又は電圧波形を観測すると、印加電圧がある値に達して初めて波形に飛躍がみられ、ストリーマの先端が補助電極に到達したことが認められる。この場合の飛躍率は、波尾に於いて生じ、波高値に影響することはない。この到達距離の測定は、埋設フィルムによっても可能であり、両者比較の結果は前記の如く一致する。

補助電極は、球状の中心電極及び外部電極（容器）と同心的であるから、少なくともストリーマがこれに到するまでは、この補助電極の存在がストリーマの進展に影響を及ぼすことは考えられない。

実験は、比抵抗が $1.2 \sim 1.6$, $2.3 \sim 2.6$ 及び $30 \text{ } \Omega\text{-cm}$ の場合について行い、中心電極として直径 4 cm の黄銅製球状電極を、補助電極は第4-2表に示すものの中から状況に応じ適当なものを選び使用し、印加電圧の極性は正、負両極性を使用した。

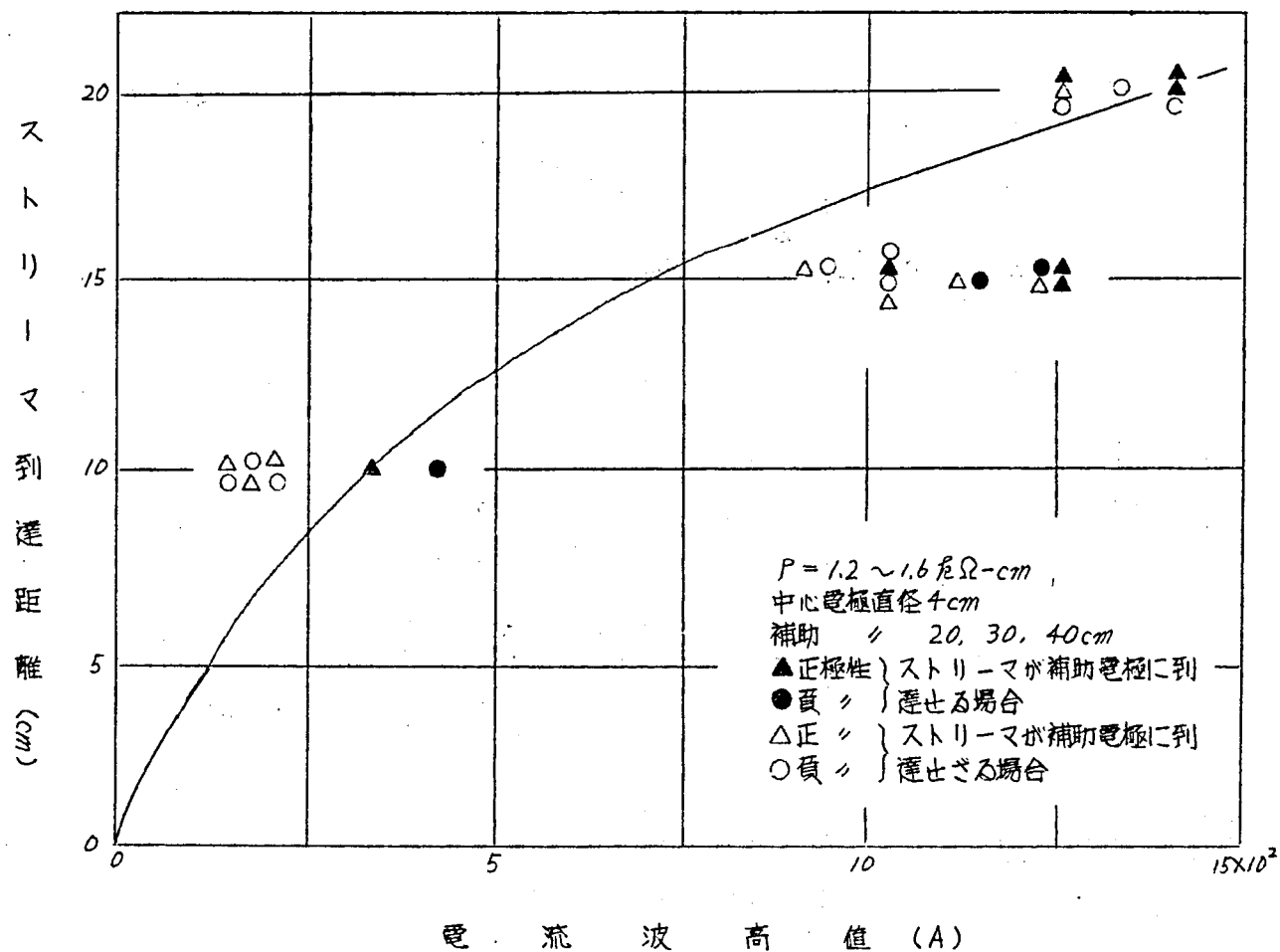
測定結果は第4-9～11図に示す如くであって、到達距離に対応する電流値としては、波尾において飛躍が生ずると否との中間値を採用した。これより明らかである如く、ストリーマの長さ (l_s) は、電流波高値 (I_m) のみならず、土の比抵抗 (ρ) にも関係するからこれらの関係を一括して示す為には l_s 即ち横軸に $I_m \cdot \rho$ をとれば、これらの曲線は殆んど一致する。これは接地抵抗の低減効果を表わす実験式の中の変数として $I_m \cdot \rho$ を用いることと関連がある。一般に土中ストリーマの各種の量を示す場合の変数として、電圧或は電流を単独に用いる代りに $I_m \cdot \rho$ を用いる時は、各種の土に対して適用することが可能となる。



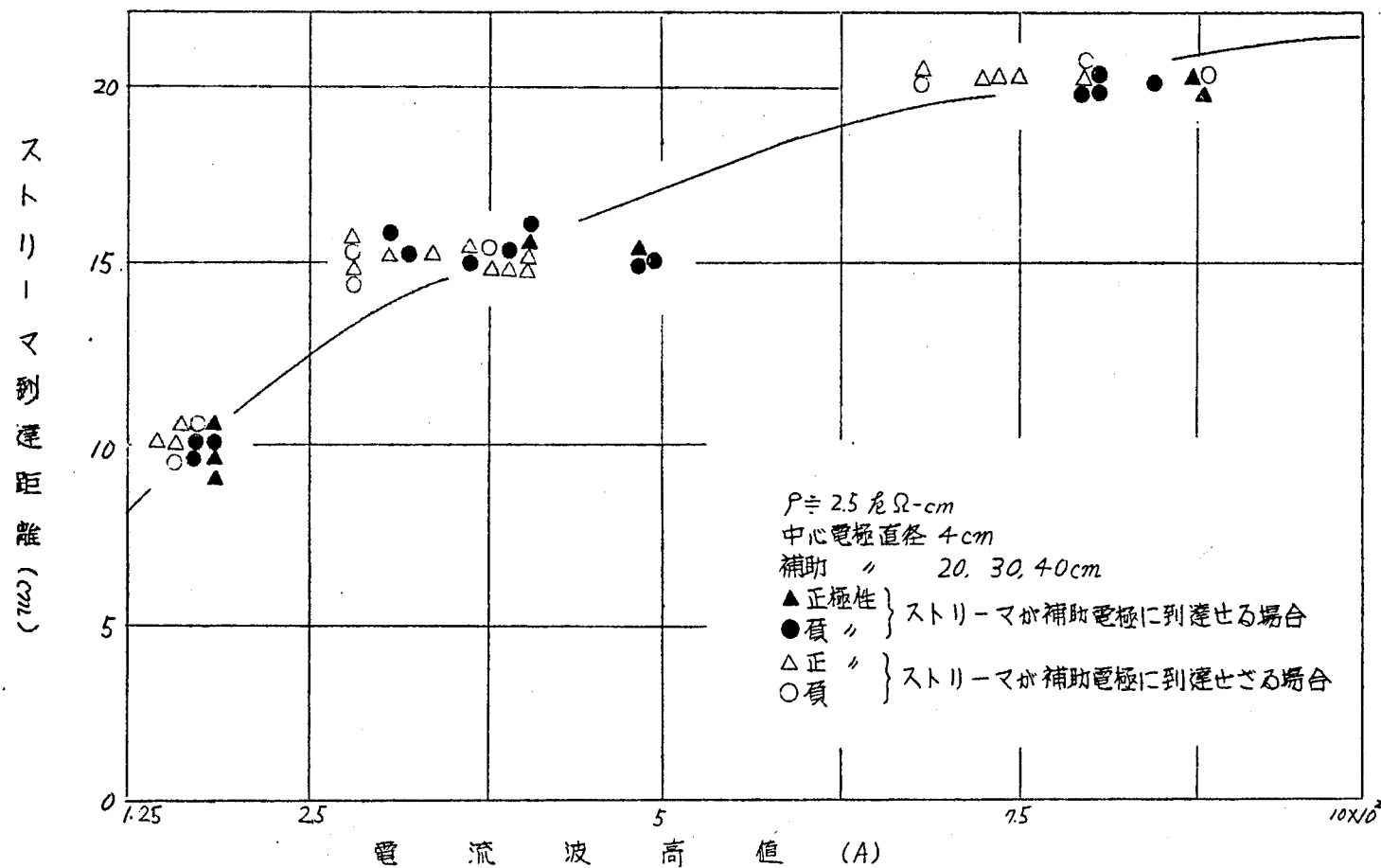
第4-8(b)図中間電極による電流波形の飛躍

$$\rho = 10 \text{ k}\Omega\text{-cm} \quad V = 105 \text{ kV}$$

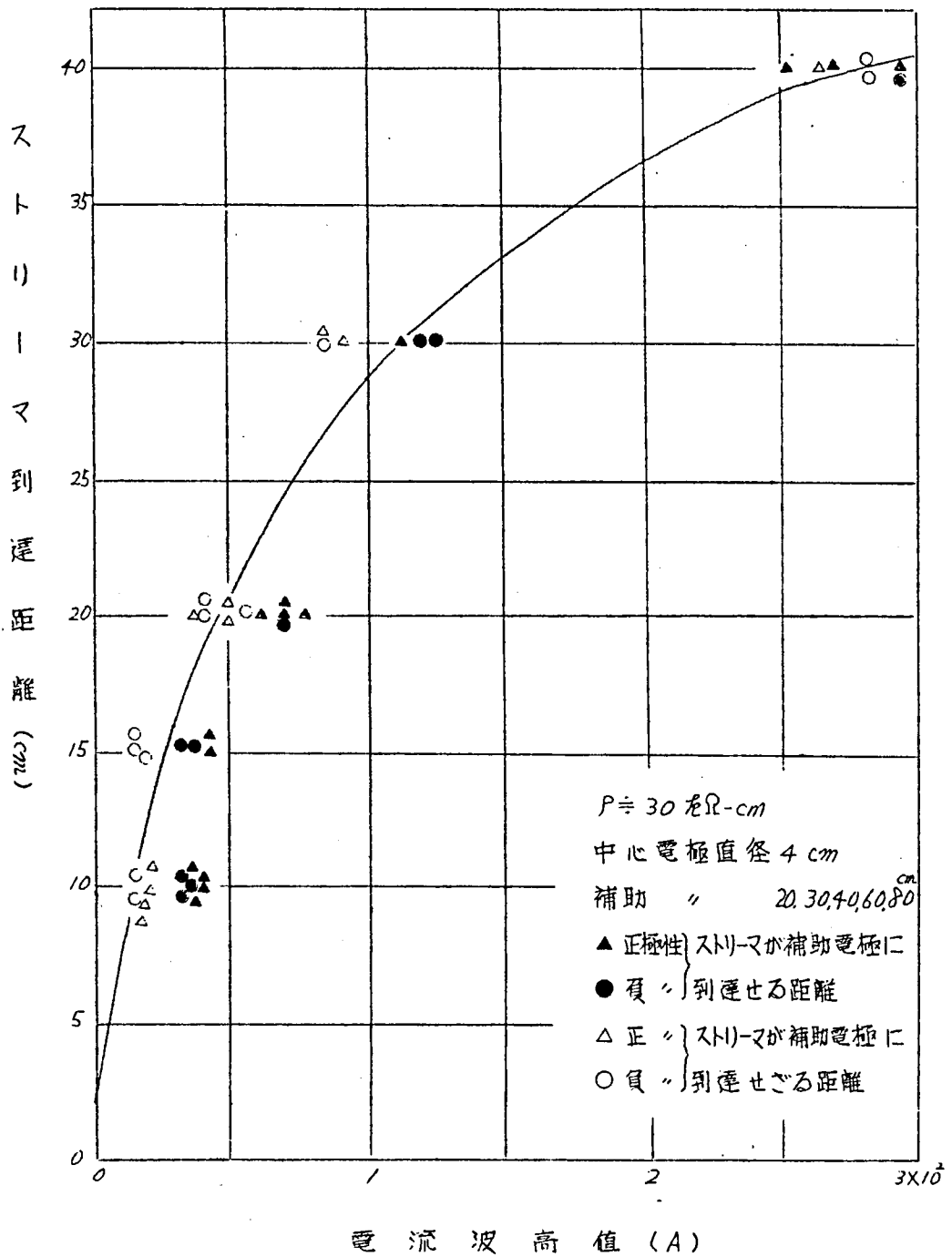
中間電極 No 1, 3, 5.



第4-9図 電流波高値とストリーマの到達距離



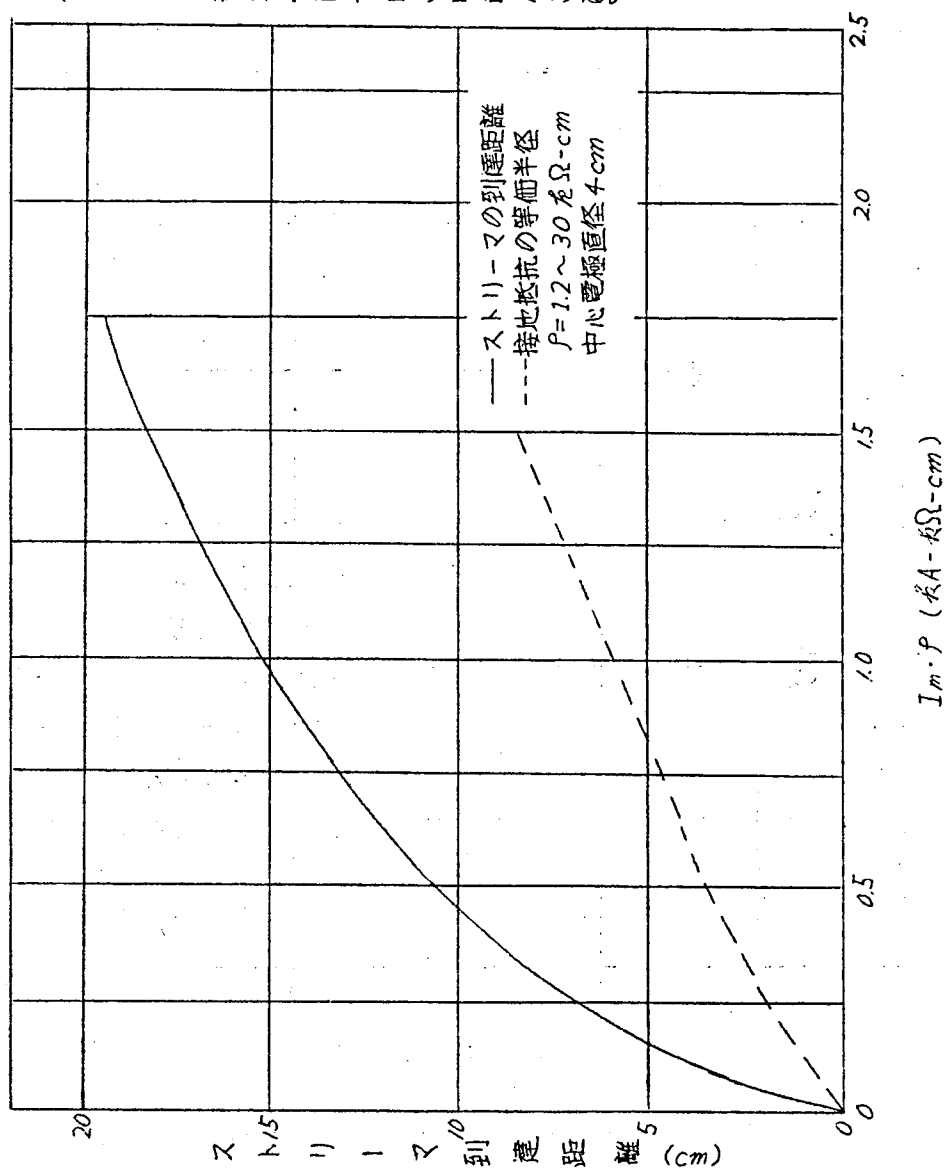
第4-10図 電流波高値とストリーマの到達距離



第4-11 図 電流波高値とストリーマの到達距離

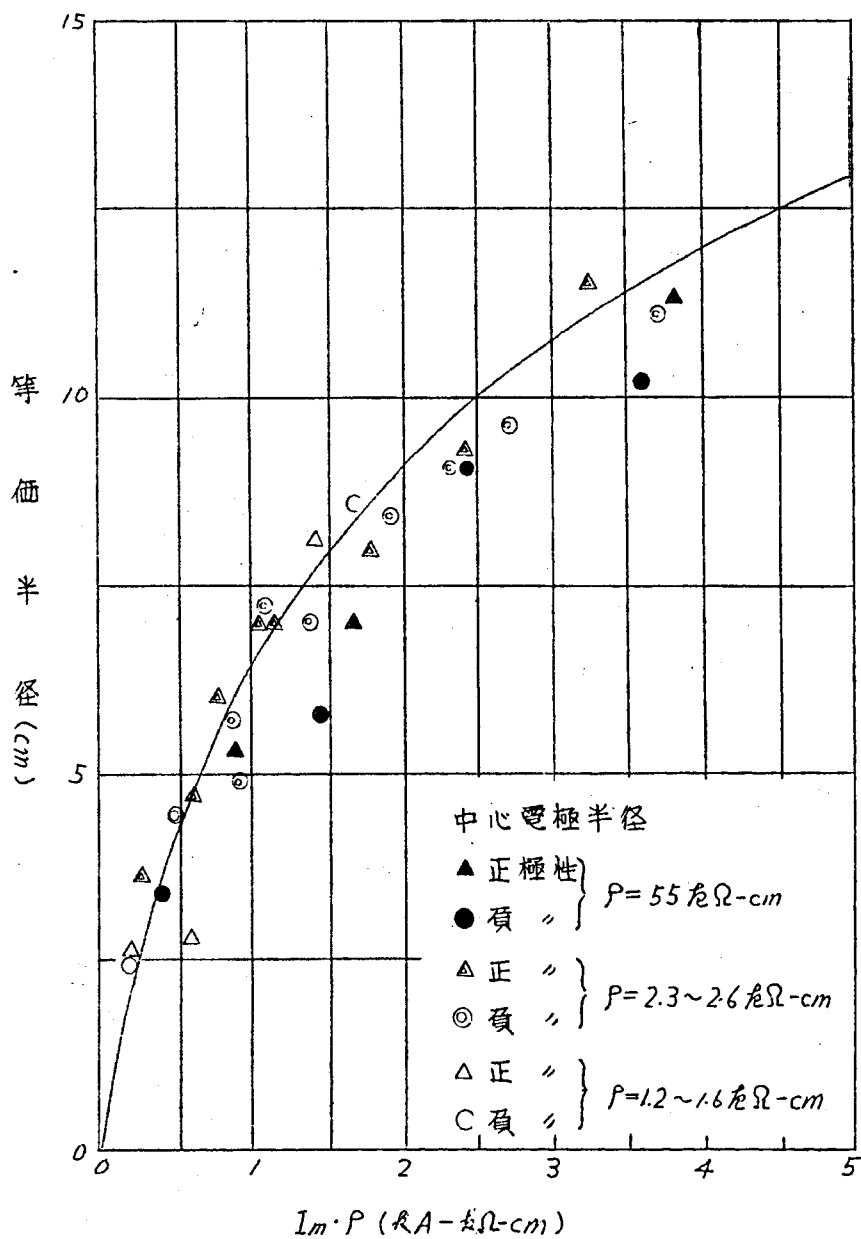
第4-12図の結果より明らかな如く、一定の電流波高値に対しては、土の比抵抗が高い程ストリーマの伸びは大きい。

前記の如く、ストリーマが樹枝状の場合、その到達距離(L)と接地抵抗の等価半径(r)との値は異なるが、実験より、両者の関係を求めるため、第4-12図に於ける測定の際に、その最低接地抵抗より r を求め、同じ図表に記入したのが、同図の実線である。これより大まかに言えば、ストリーマの到達距離は等価半径の2倍である。



第4-12図 種々の比抵抗の土中に於けるストリーマの到達距離

尚、 $I_m \rho$ と r との実測結果を更に広範囲に亘って示せば第4-13 図の如くである。



第4-13図 $I_m \cdot \rho$ と等価半径との関係

又この関係は、式(1-10)を用いて求めることができる。

即ち

$$R_{min} = \frac{\rho}{2\pi Ls} \ln \left\{ \frac{2Ls}{r_0} \right\}$$

但し $r_0 \rightarrow \infty$

一方球状電極に対しては

$$R_{min} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{r}$$

$$\frac{r_0}{2} = 1cm, \quad Ls \doteq 10cm \text{ の時には}$$

$$Ls \doteq 2r \quad n \doteq 2$$

が成立する。

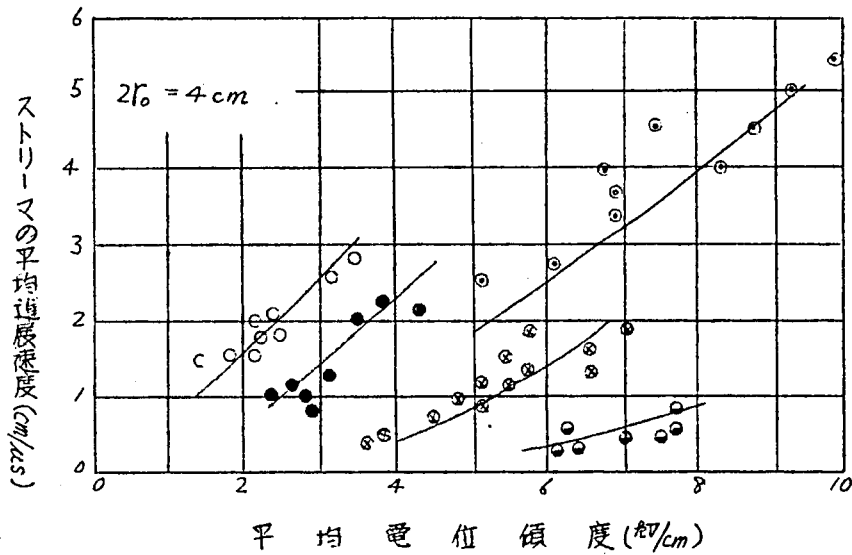
この場合、ストリーマが中心電極に接する場所での直径($2r_0$)の値はこの場合、4cm程度であることは、フィルム上の像より認められるところである。上式より明らかで如く、 n の値は、電極の形、印加電圧の変化により、多様に変化する性質のものである。

§4. 土中ストリーマの平均進展速度

ストリーマの進展速度は、接地抵抗の時間的変化に対し大きく影響を与える。Petrooulos は、その速度は $10cm/\mu s$ 程度であると推定しているが直接的な観察法を行う為前節に示した中間補助電極によるストリーマの到達距離測定方法を利用し、電圧印加の瞬間より、電流波形に飛躍が現われる時間を以て、ストリーマが中間電極の位置まで延びるに要する時間とみて、これより進展速度を計算した。ストリーマは各瞬間に於いて速度を変えずから、これによって測定せられるものは、平均速度と見做すべきであり、第4-14 図には、含水率 4.4~16%, $\rho = 0.880 \sim 6.0 \Omega \cdot cm$ に於けるストリーマ平均進展速度を示す。

但し、横軸の平均電位傾度としては、ストリーマ成長中の電流密度と

土の比抵抗との積の電極間に於ける値をとったものである。



	補助電極直径(cm)	土の含水率(%)	土の比抵抗(Ω cm)
○	40	16	0.880
●	"	10	1.225
◎	20	4.4	6.000
⊗	30	"	"
⊙	40	"	"

第4-14 図 ストリーマの平均進展速度

平均進展速度は、中間電極の直径の大小により、その値は着しく異り、一般にその径が大となるにつれて、平均速度は低下する。

またストリーマの発生により、その周囲の電界は変化するから、速度を示すための変数としては、平均電界、電圧、電流波高値、及び前記の $I_m \cdot \rho$ 等が考えられる。

また、中間電極は、その電圧、電流の大きさに従って、その密度適当

せものを送るべきものであり、或は、これら中間電極を幾個も重ねることにより、数回の飛躍が得られ、これにより、各位置に於ける瞬間速度も近似的に判明する。

中間電極を幾個も重ねることは、測定 of 誤差を大きくする。それは、中心電極より発生したストリーマの先端は土壌の破壊電位傾度又はそれ以上の電位傾度を以て進展してゆくが、第一の補助電極に達すると、その電位傾度は一時的に低下して、ストリーマは一時その進展を中止し、更に印加電圧が上昇するのを待って、この補助電極の外側にストリーマが発生する場合があるからである。

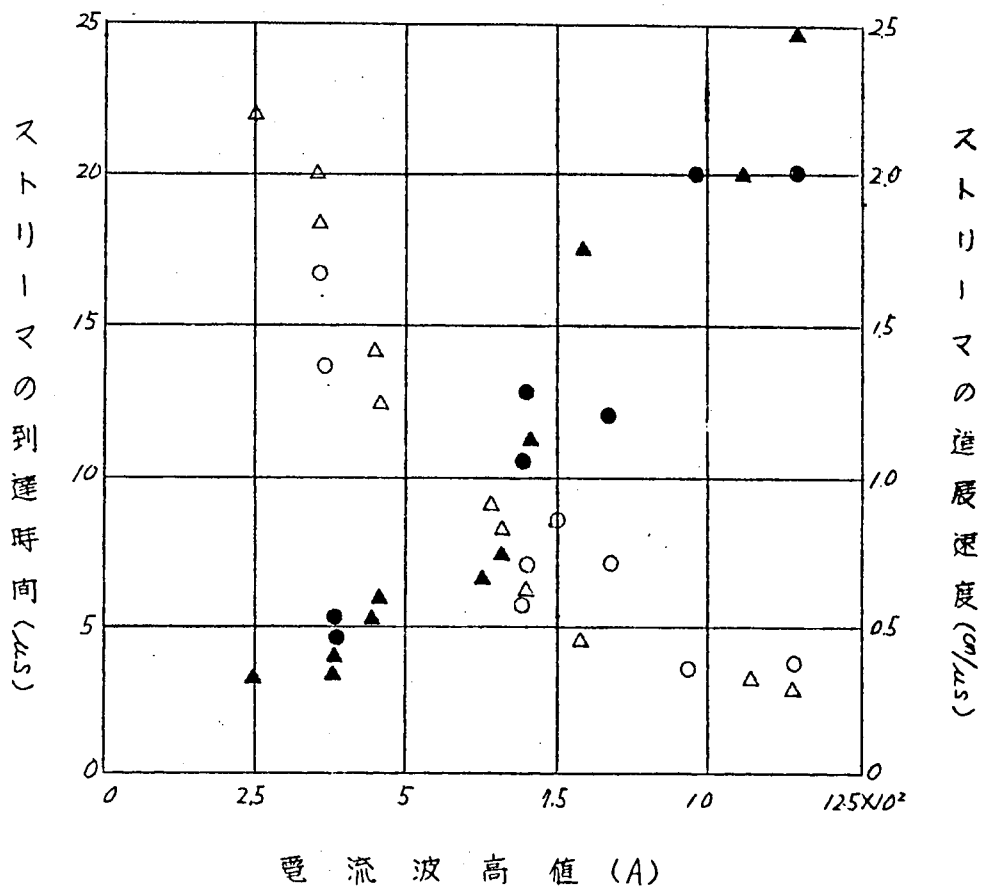
この時間を澱みと呼ぶこととすれば、補助電極第一と第二との間のストリーマ進展時間は、この澱みを含むものがオシログラムに現われるから、この時間を分離する必要がある。

澱みの時間は、中間電極の外側に針金の刺をつけて、不平等電界を作ることにより、多少短くなることを実験的に確かめている。

更に中心電極に電圧を印加してよりストリーマが発生するまでの時間を、電圧電流特性より等価半径の増加開始までの時間として計算すると、印加と殆んど同時であり、こゝに於ける澱みは問題ないと考えられ、更に後記の散断波による実験においても、このことは認められるからである。

従って、中心電極と補助電極1個のみを用いた場合には本方法による進展速度の測定は正確な値が得られる。

第4-15~22図は、 P 及び補助電極の各種の値につきストリーマ到達時間及び平均進展速度を測定したものであり、横軸には電流波高値を用いた。また前記に則り、 $I_m \cdot P$ を横軸にとれば、これらの結果の一括表示が可能であるので、第23~25図にはこれらの実測値を近似的に一本の曲線にて表示する。



第 4-15 図 土中ストリーマの平均進展速度 (其 1 -)

$\rho = 1.6 \times 10^9 \text{ } \Omega\text{-cm}$

中心電極半径 2cm

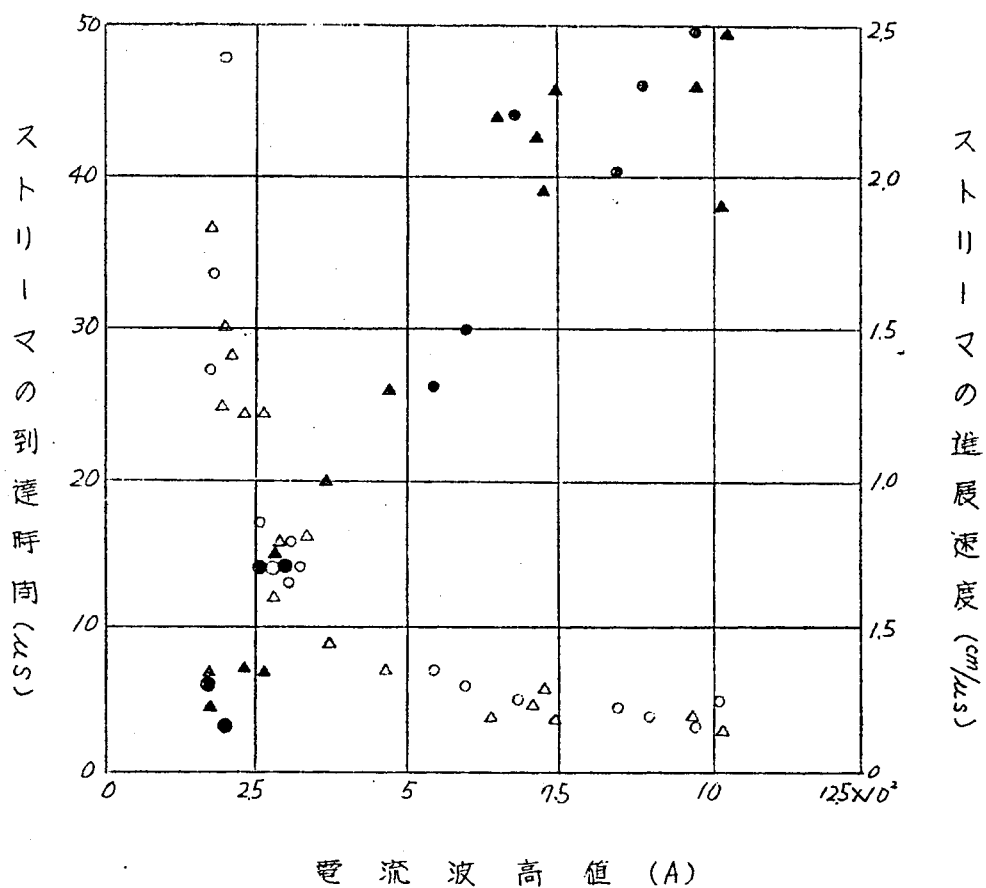
補助 “ 10”

△ 正極性ストリーマ到達時間

○ 負 “ “

▲ 正 “ ストリーマ進展速度

● 負 “ “



第4-16図 土中ストリーマの平均進展速度 (其ノニ)

$\rho = 2.5 \text{ 兎}\Omega\text{-cm}$

中心電極半径 2cm

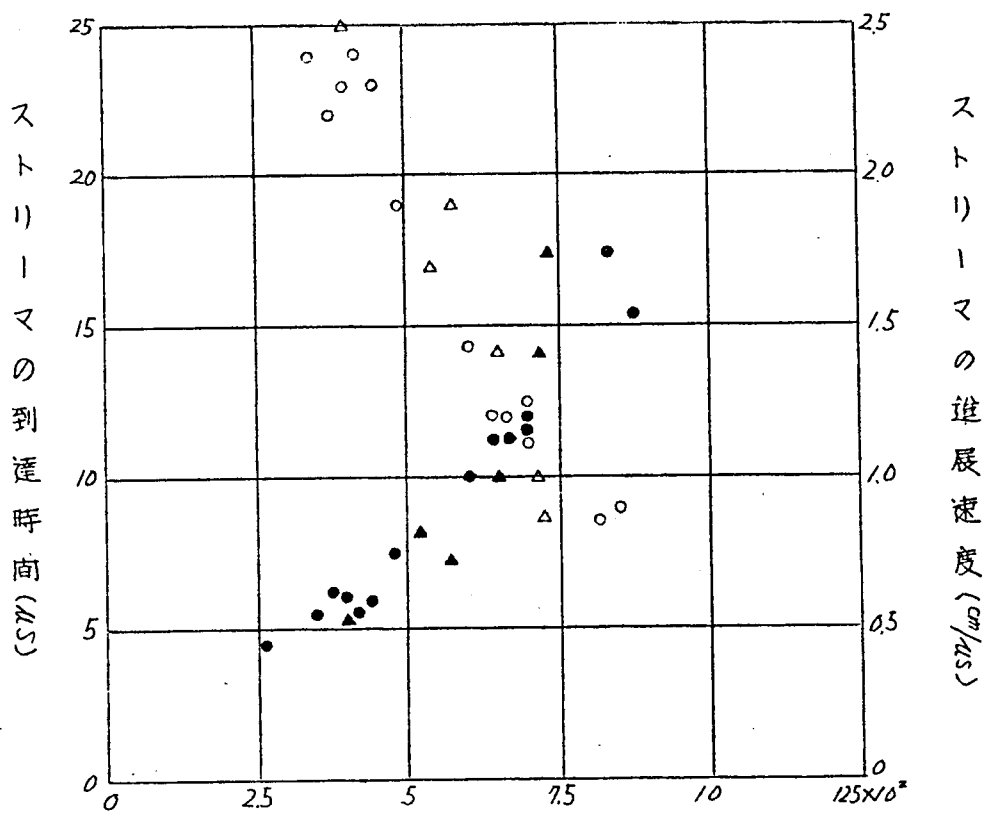
補助 〃 10〃

Δ 正極性ストリーマ到達時間

\bigcirc 負 〃 〃

\blacktriangle 正 〃 ストリーマ進展速度

\bullet 負 〃 〃



第4-17図 土中ストリーマの平均進展速度 (其ノ三)

$\rho = 2.4 \times 10^9 \Omega\text{-cm}$

中心電極半径 2 cm

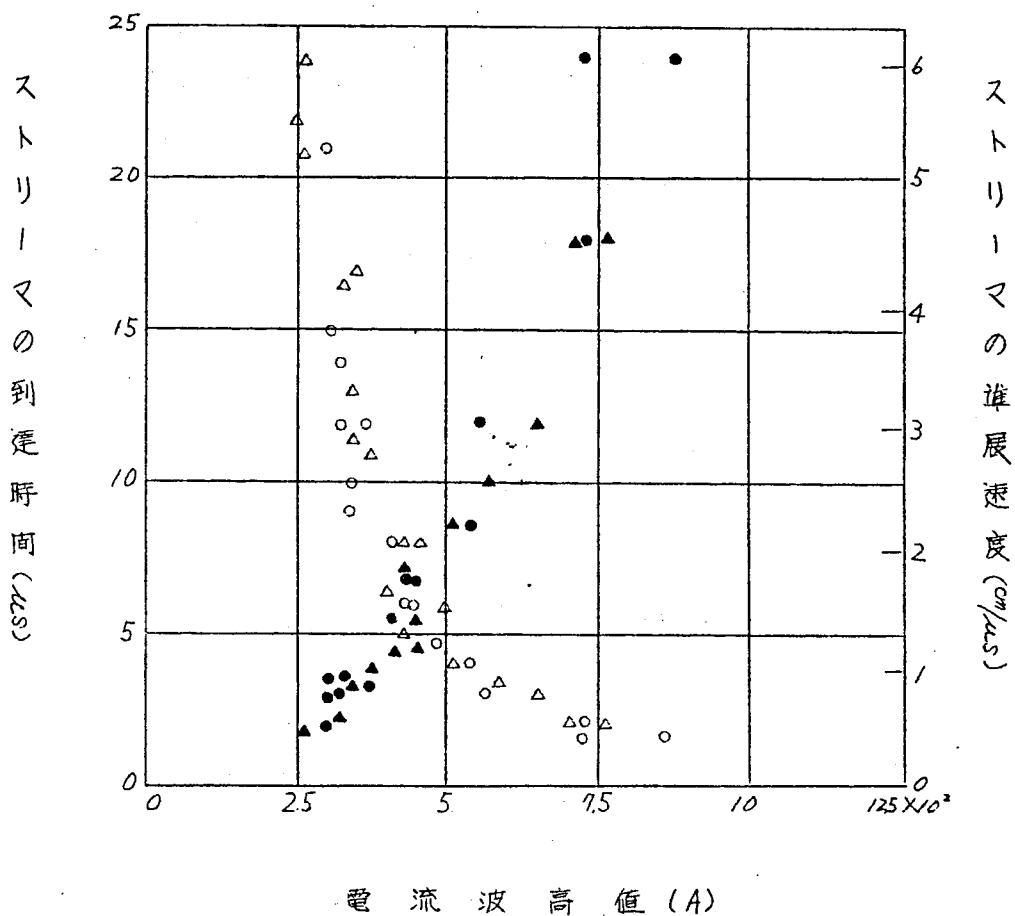
補助 “ 15 “

△ 正極性 ストリーマ 到達時間

○ 負 “ “

▲ 正 “ ストリーマ 進展速度

● 負 “ “



第4-18図 土中ストリーマの平均進展速度 (其ノ四)

$P = 30 \text{ } \Omega\text{-cm}$

中心電極半径 2cm

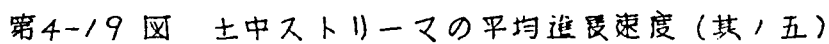
補助 " 10cm

△ 正極性ストリーマ到達時間

○ 負 " "

▲ 正 " ストリーマ進展速度

● 負 " "

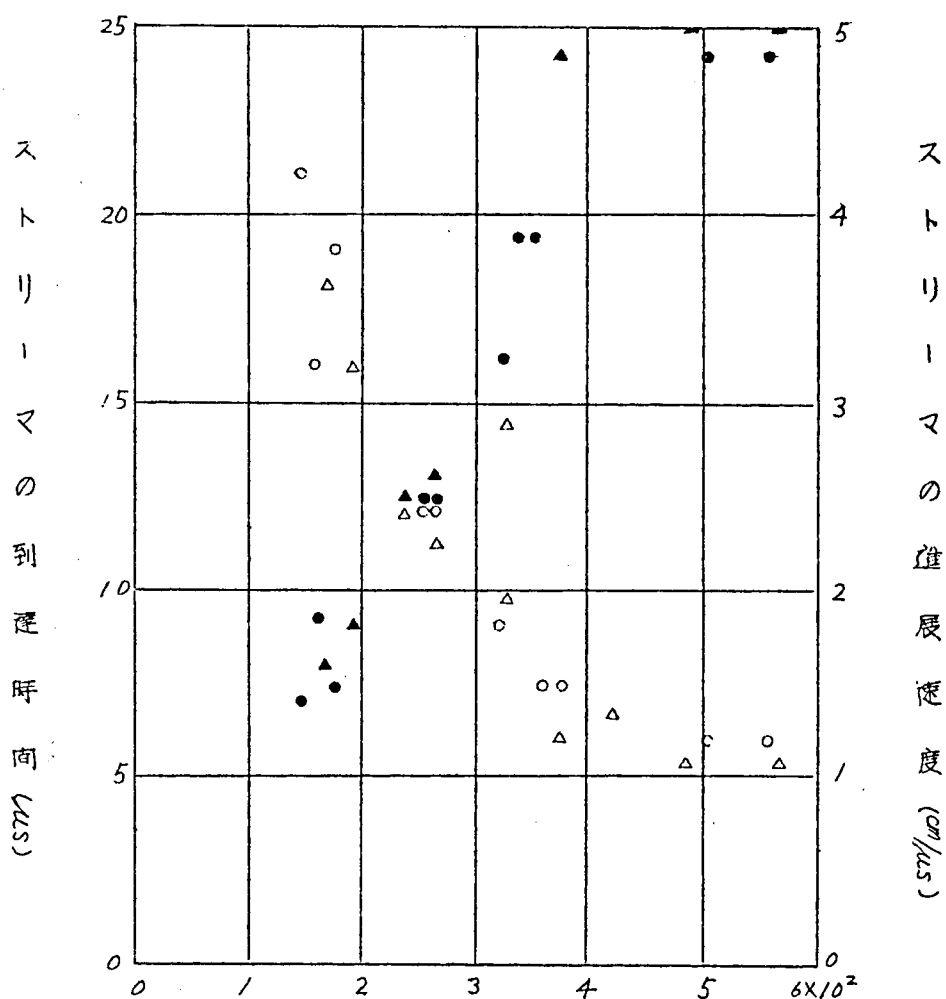


●頁二



ストリーマの進展速度 (cm/ms)

●負 〃 〃



電 流 波 高 値 (A)

第4-21図 土中ストリーマの平均進展速度 (其ノ七)

$P = 30 \text{ } \Omega\text{-cm}$

中心電極半径 2cm

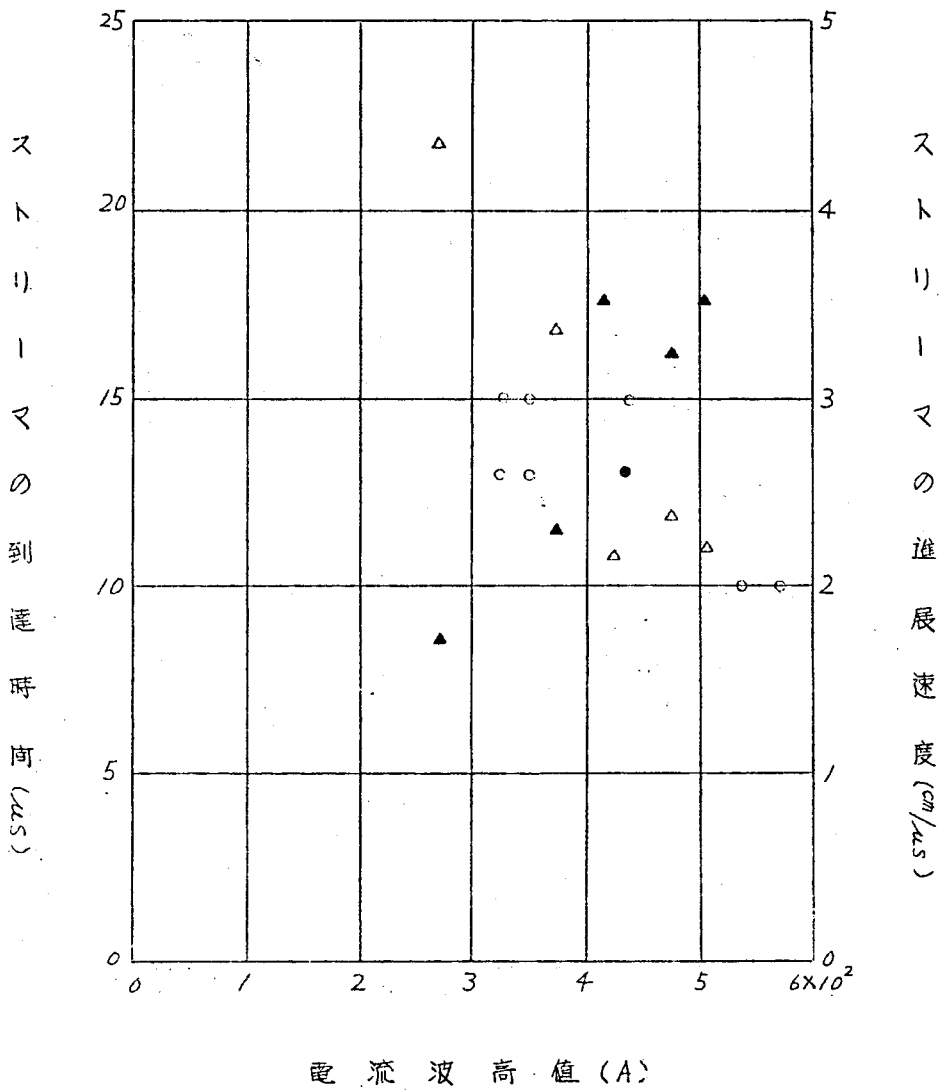
補助 " 30"

△ 正極性ストリーマ到達時間

○ 負 " "

▲ 正 " ストリーマ進展速度

● 負 " "



第4-22 図 土中ストリーマの平均進展速度 (其ノハ)

$\rho = 30 \text{ } \Omega\text{-cm}$

中心電極半径 2cm

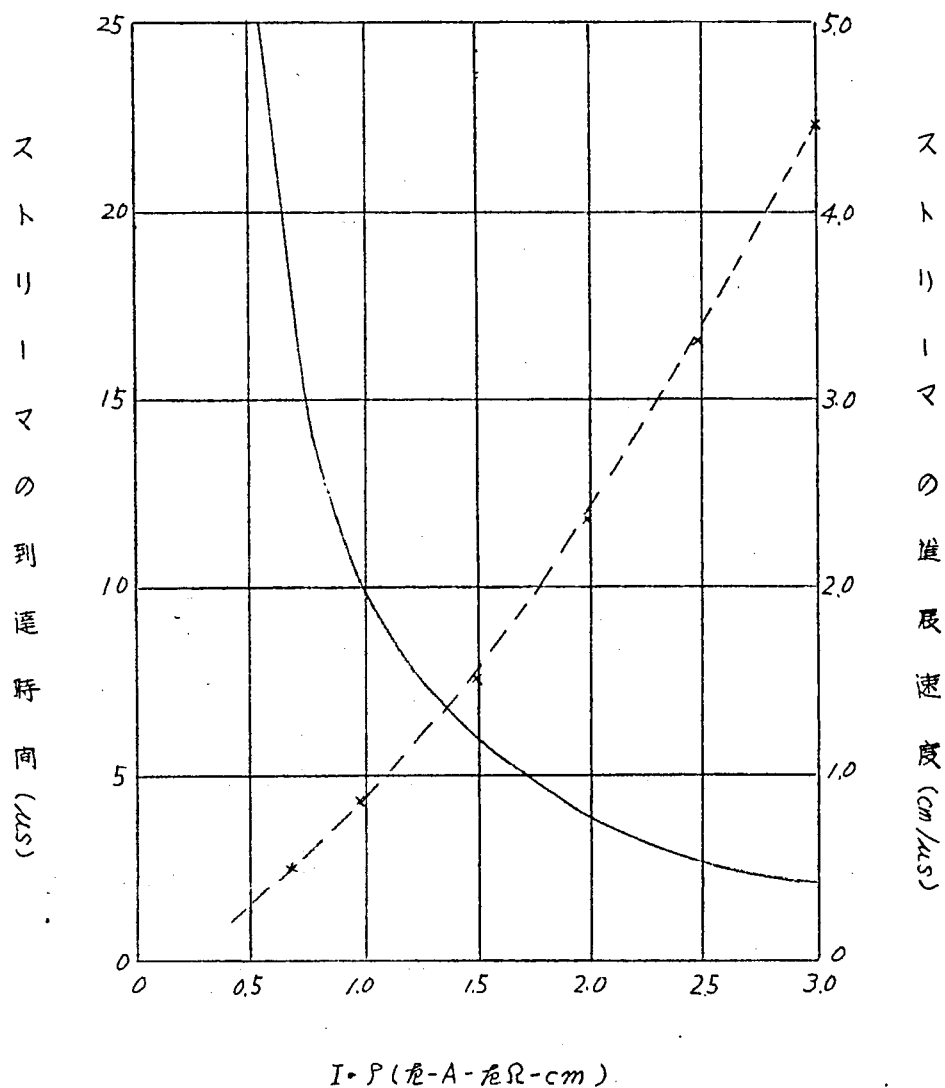
補助 “ 40”

△ 正極性ストリーマ到達時間

○ 負 “ “

▲ 正 “ ストリーマ進展速度

● 負 “ “



第4-23 図 $I \cdot P$ とストリーマの進展速度 (其ノ一)

中心電極半径 2cm

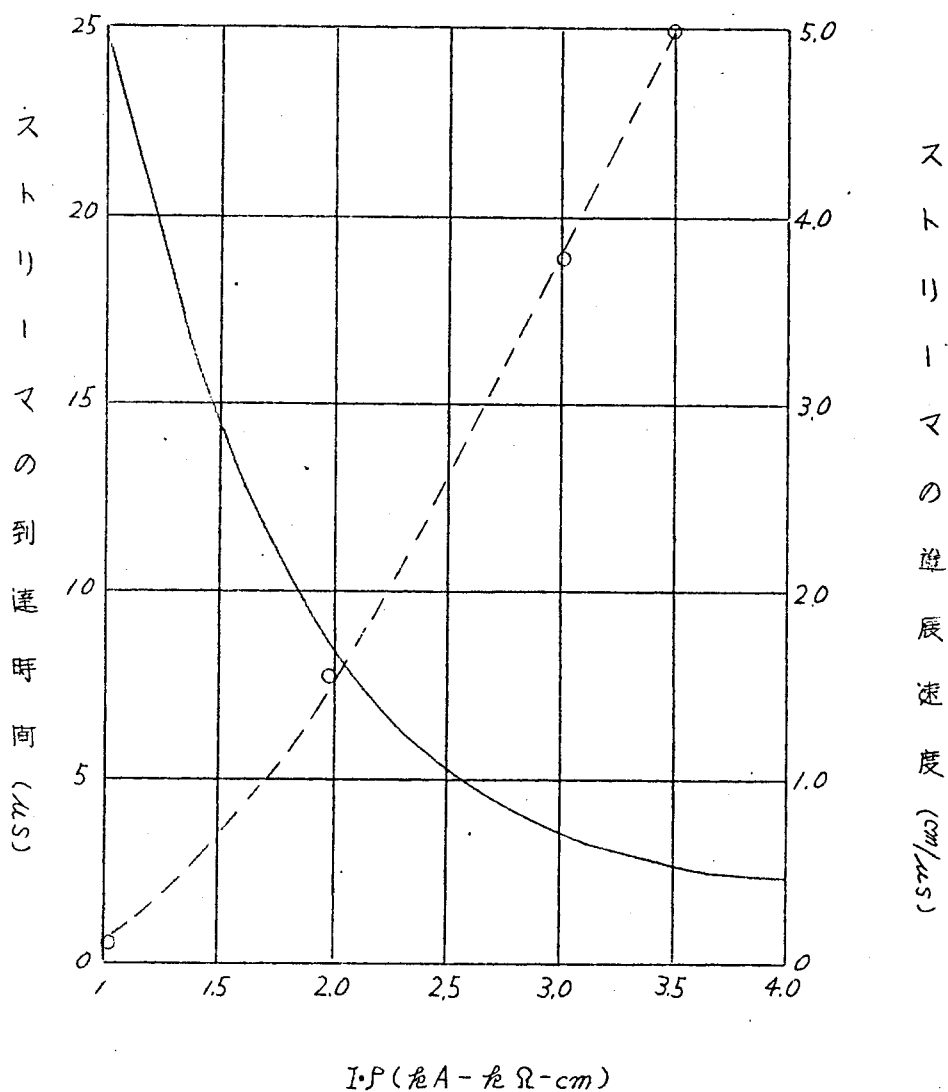
補助 " 15cm

$P = 1.2 \sim 30$ VΩ-cm

— ストリーマの到達時間

--- " 進展速度

正 負両極性



第4・24図 $I \cdot P$ とストリーマの進展速度 (其ノ二)

中心電極半径 2cm

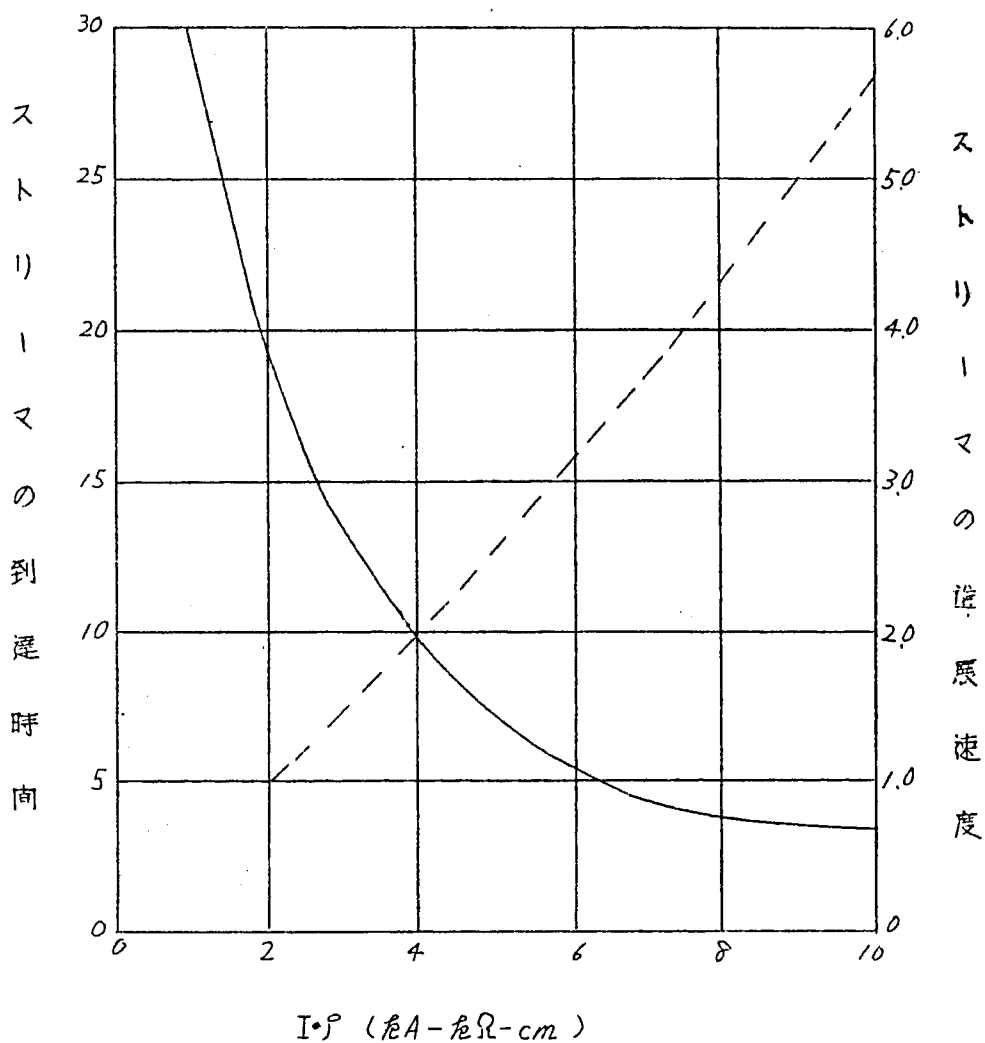
補助 " 10cm

$P = 1.2 \sim 30 \text{ A} \cdot \Omega \cdot \text{cm}$

— ストリーマの進展時間

---- " 到達距離

正, 負両極性



第4-25図 $I \cdot \rho$ とストリーマの進展速度 (其ノ 三)

中心電極半径 2cm

補助 " 20cm

$\rho = 1.2 \sim 30$ Ω-cm

— ストリーマの到達時間

--- " 進展速度

正. 負両極性

§5. 土中ストリーマの成長

本章 § 1. に示した如く土中ストリーマの形状、大きさ等は、印加電圧の波形、及びその波高値、土の比抵抗等により、多岐に変化するが、更に同一ストリーマは、その発生から消滅に至るまでの間に刻々変化するから、その様相を観察するため、以下の如き実験を行った。

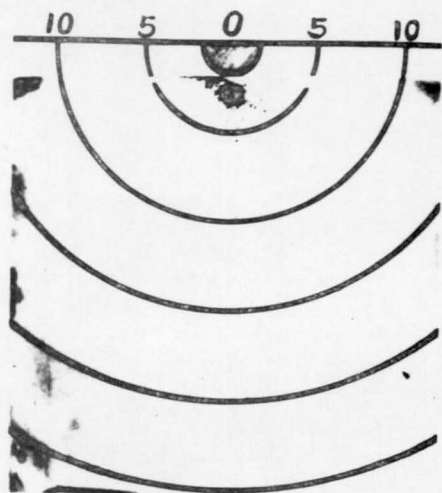
埋設した X 線用フィルムにより観察される土中ストリーマ像は主としてストリーマが充分延び切った（即ち電流が波高値に達した瞬間の）状態であって、電圧を印加して後ストリーマが時間と共に成長して行く状態は、このまゝとは知ることはできない。特にストリーマがその接地抵抗の低減に最も重要な役割を果たす瞬間の印加電圧波頭長 T_f 附近のストリーマ像は、たゞその時間に於ける接地抵抗から接地電極の実効半径を逆算して推測するのみである。これに対し埋設フィルムと截断波とを併用した例えば截断時間 T_c が T_f に等しい截断波を印加すれば、印加電圧が波高値に達した瞬間のストリーマ像がフィルムに得られる。

かくして前章第 2-6 図に示す如き回路を使用し、順次 T_c を変化させることにより、 T_c に対応する瞬間のストリーマの形状、大きさ、瞬間速度等を究明に知ることができる。²⁹⁾

第 4-26, 27 図は、第 4-3 表に示す条件下におけるストリーマの成長状態を示す。この方法により、波高値が同一で波頭長の異なる二種の衝激電圧に対し、 T_c とストリーマの長さとの関係を半対数グラフ上に記すれば第 4-28 図の如く平行する二つの直線により近似される。

第 4-3 表 截断波印加条件

	4-26 図	4-27 図
印加電圧 (μV)	25	28
T_f (μS)	10	5
T_c (μS)	7.5 ~ 25	2.5 ~ 10



(a) $T_0 = 7.5 \mu s$



(b) $T_0 = 10 \mu s$



(c) $T_0 = 15 \mu s$

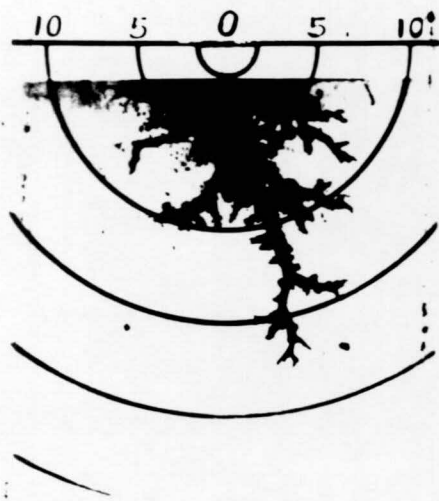
図 26 - 4

観察の成長ストリーマ土中による波断截

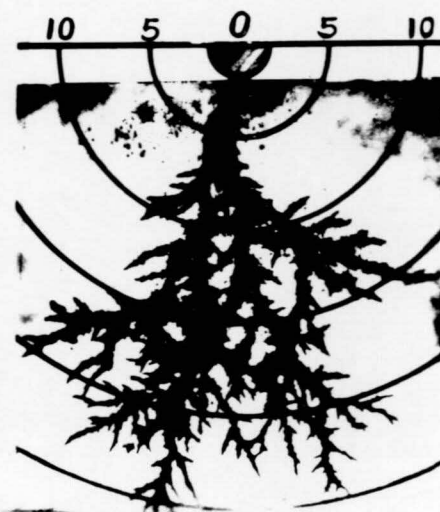
$T_f = 10 \mu s$, $\rho = 19 k\Omega \cdot cm$ $V = 25 kV$ $D = 3.5 cm$



(d) $T_0 = 20 \mu s$



(e) $T_0 = 25 \mu s$



(f) 全 波

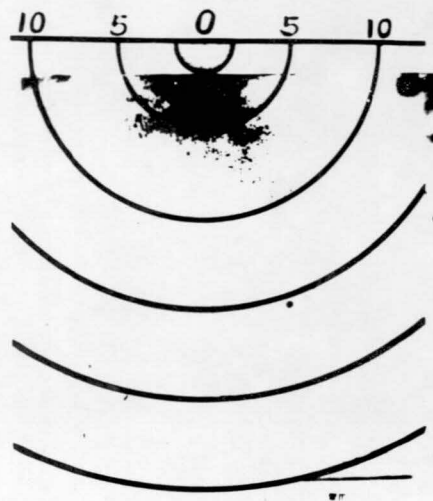
才 4 - 26 図

截断波による土中ストリーマ成長の観察 (続き)

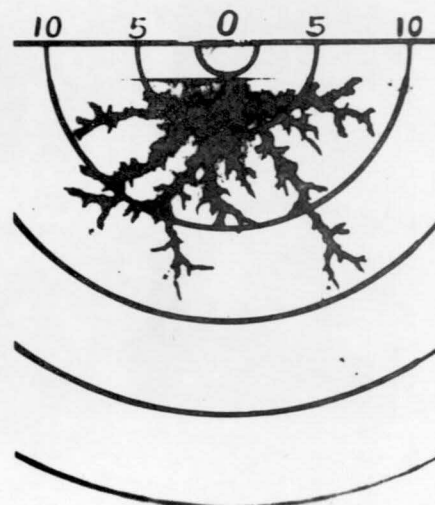
$T_f = 10 \mu s$ $\rho = 19 K\Omega \cdot cm$ $V = 35 KV$ $D = 3.5 cm$



(a) $T_0 = 2.5 \mu s$



(b) $T_0 = 5 \mu s$

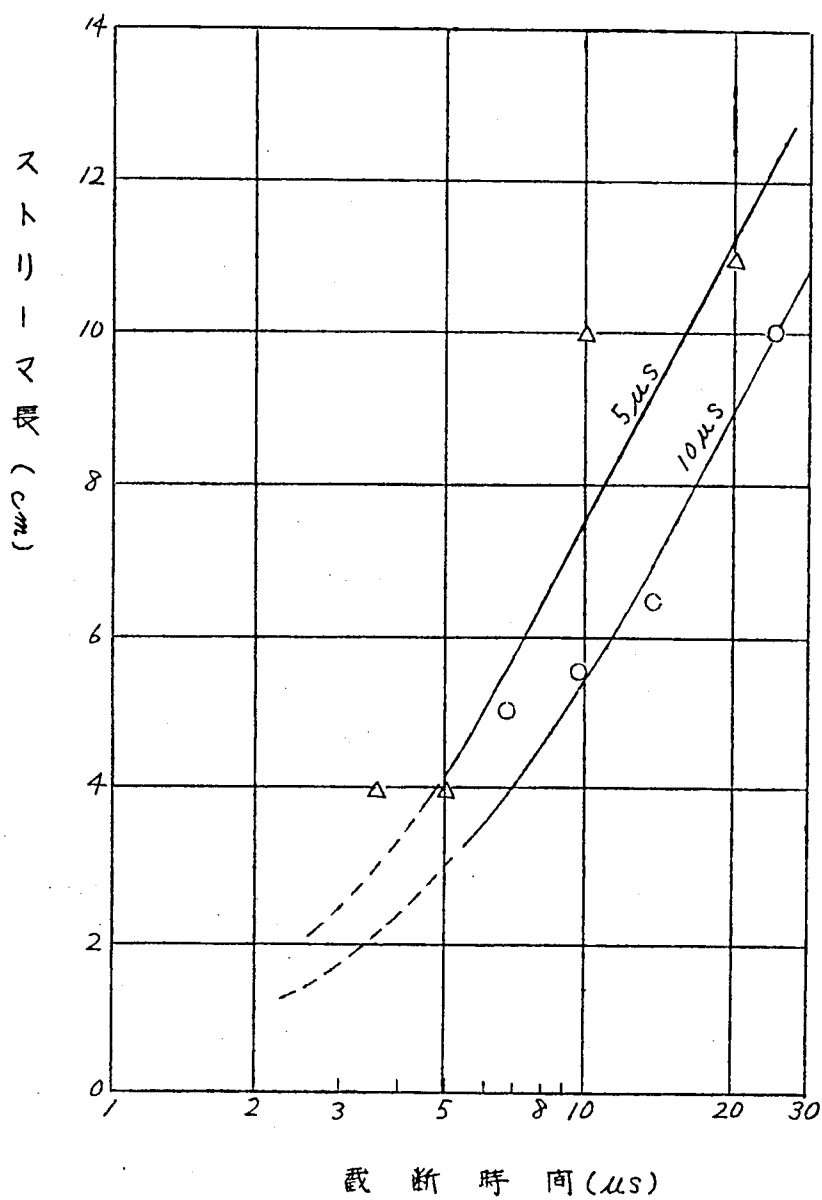


(c) $T_0 = 10 \mu s$

才 4 - 27 図

截断波による土中ストリーマ成長の観察

$T_f = 5 \mu s$ $\rho = 15 k\Omega - cm$ $V = 35 kV$ $D = 3.5 cm$



第4-28図 截断波とストリーマ長

従って、実験式として

$$l_s = A \log_{10} t + B \quad (4-1a)$$

但し l_s : ストリーマの長さ (cm)

t : 時間 (μs)

A, B : 定数

これより瞬間速度は

$$v_s = \frac{A'}{t} \quad (4-16)$$

但し v_s : ストリーマの進展速度 ($\text{cm}/\mu\text{s}$)

上式は $0 < t < T_t$ の間で成立し、印加電圧の値により多少異なるが、半波尾長 T_t 以後はストリーマは急速に消滅し、その後は式 (4-1) は成立しないと考えられる。この方法ではストリーマ消滅の極相を撮影できぬ様みがある。

尚数十枚の埋設フィルムにより、次の結論を得た。

- (1) 第4-26, 27図よりも明らかな如く、印加電圧波頭部分に於けるストリーマは、中心電極の周辺に同心球状に延びる。従って全波電圧印加の際のストリーマは樹枝状である場合も、その初期に於ては同心球状である。接地抵抗の低減効果は、碑子の閃絡時間の立場より、主として電圧の波頭部分が問題となるが、その附近では、ストリーマは球状と見做すことができる。
- (2) 上記の初期の同心球状のストリーマは T_f が短い場合は波高値まで保たれるが、逆に T_f が長く電圧波頭が緩い場合には、立上り途上で樹枝状となる。これは T_f による低減効果の差異の原因となるものと考えられる。
- (3) 電圧波高値が等しく、 T_f が異なる場合には、第4-28 図に見る如く、ストリーマ長と時間との関係直線はほぼ平行となり、急峻な場合のストリーマが一定時間だけ先行する形となる。

第5章 電流による土の比抵抗の変化

§1. 概 説

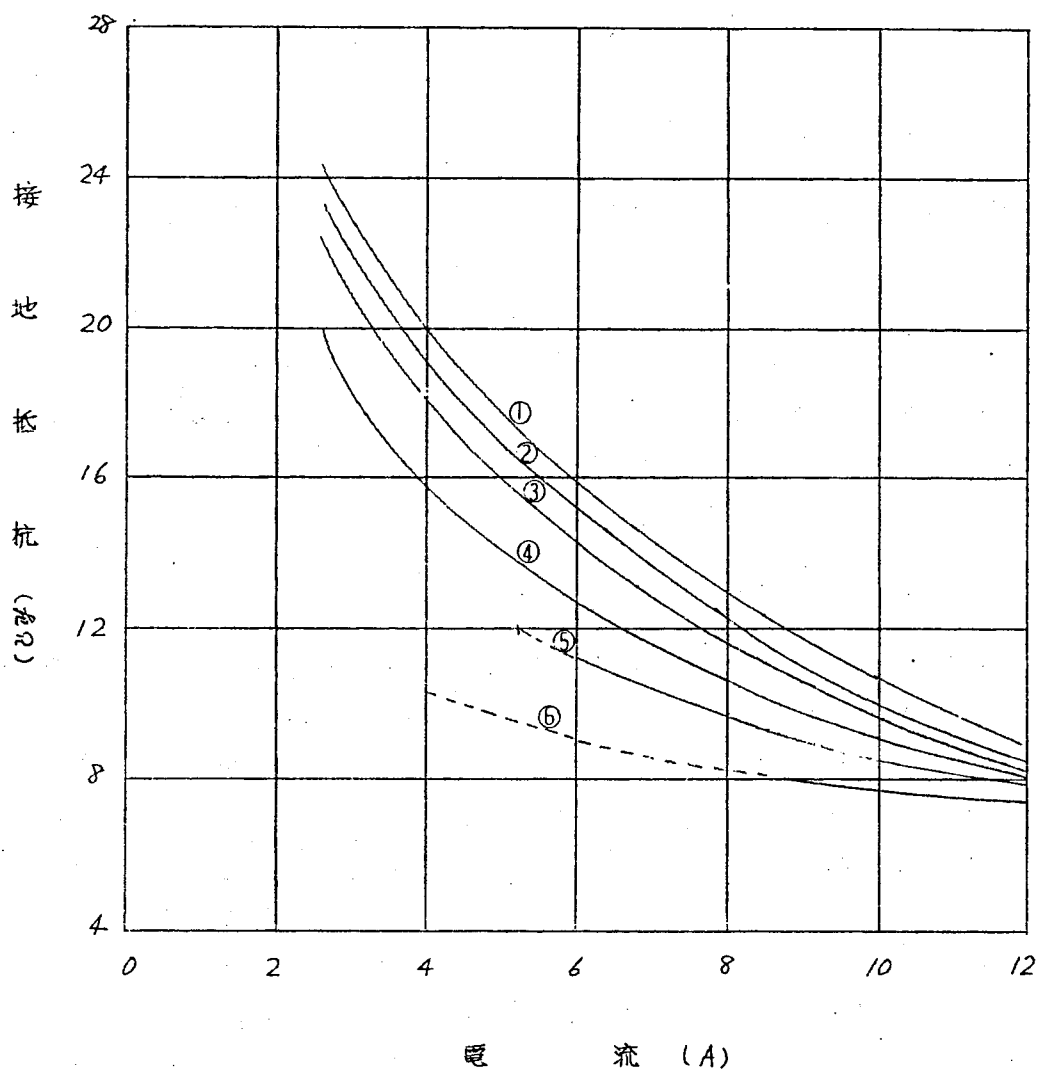
第1章式(1-17)～(1-20)に示す如く、土中ストリーマが発生しない場合でも、大電流に対する接地抵抗の低減効果が生ずるが、これは前者に対し、その値が微小であるため、実際には看過されている。本章においては、赤土に木炭粉3.5%（重量比）を均等に混入した資料にてこの種の低減効果が顕著であることを利用し、その電流密度対比抵抗特性(i - ρ 特性)を測定し、且つその接地抵抗の電流値に対する変化を検討した。

§2 電流密度対比抵抗特性(i - ρ 特性)

i - ρ 特性を求めるには、平板電極間に資料土壌を満ちし電圧、電流を求めればよいが、実験の際、電極の終端より空气中又は土中にて閃絡を起し易く、測定が困難である。これに対し、球状中心電極6種($r_0=4, 5, 7.5, 10, 15$ 、及び 20cm)を用い、外部電極($r_e=83\text{cm}$)との間の抵抗をはかり、同一電流に対する抵抗の差より i - ρ 特性を計算した。但し、印加電圧の大きさは、土中ストリーマが発生しない範囲で行い、ストリーマの存否は埋設フィルムにより、これを確認した。接地抵抗及び i - ρ 特性は第5-1及び5-2図に示す如くであつて、計算方法としては、電流 I_0 に対し、中心電極の大きさ r_{01}, r_{02} の時、接地抵抗が R_1, R_2 であるとする

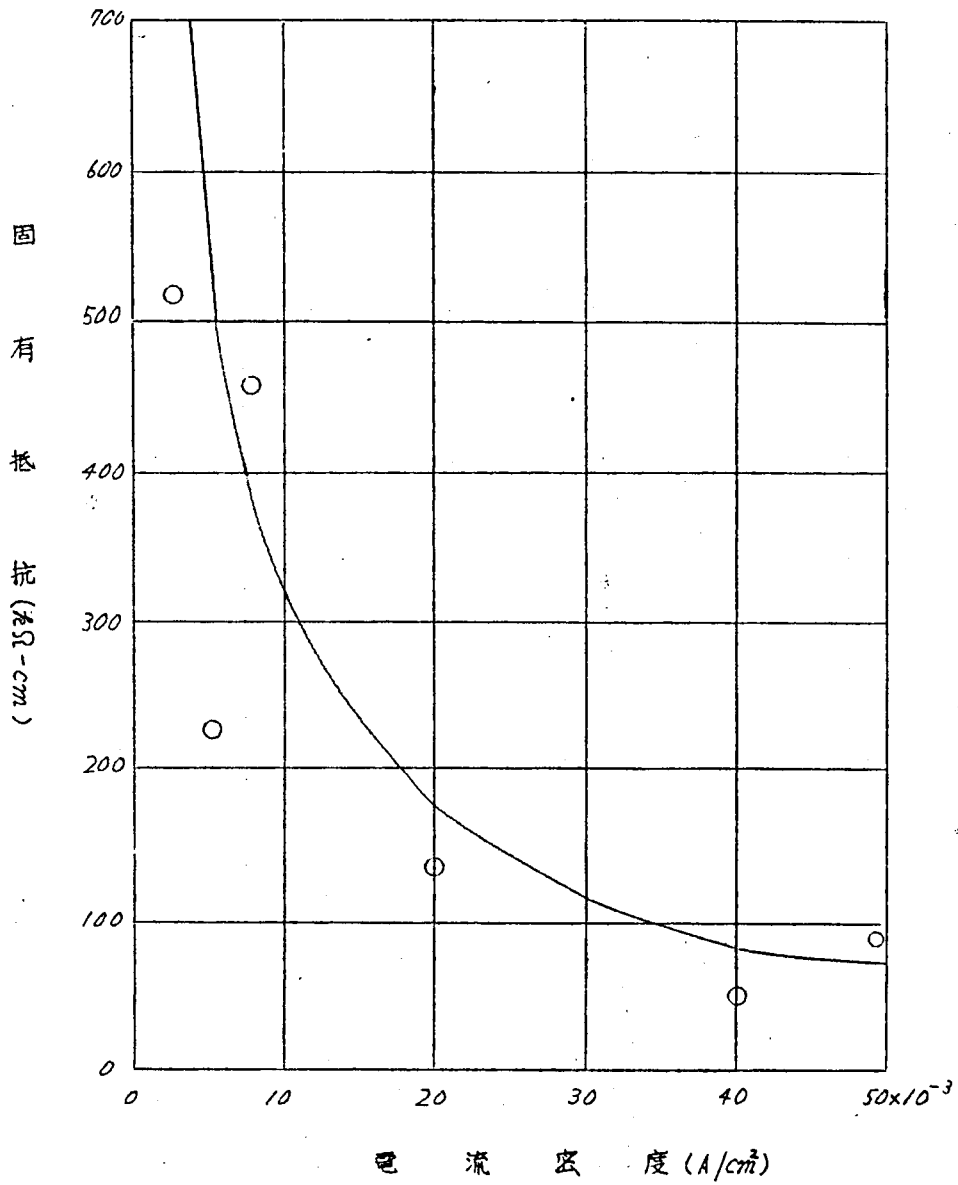
$$R_1 - R_2 = \frac{\rho}{2\pi \left(\frac{r_{01} - r_{02}}{2} \right)} (r_{02} - r_{01})$$
$$\therefore \rho(i) = (R_1 - R_2) \frac{2\pi \left(\frac{r_{01} + r_{02}}{2} \right)}{r_{02} - r_{01}} \quad (5-1)$$

$$\text{但し} \quad i = \frac{I_0}{2\pi \left(\frac{r_{01} + r_{02}}{2} \right)^2}$$



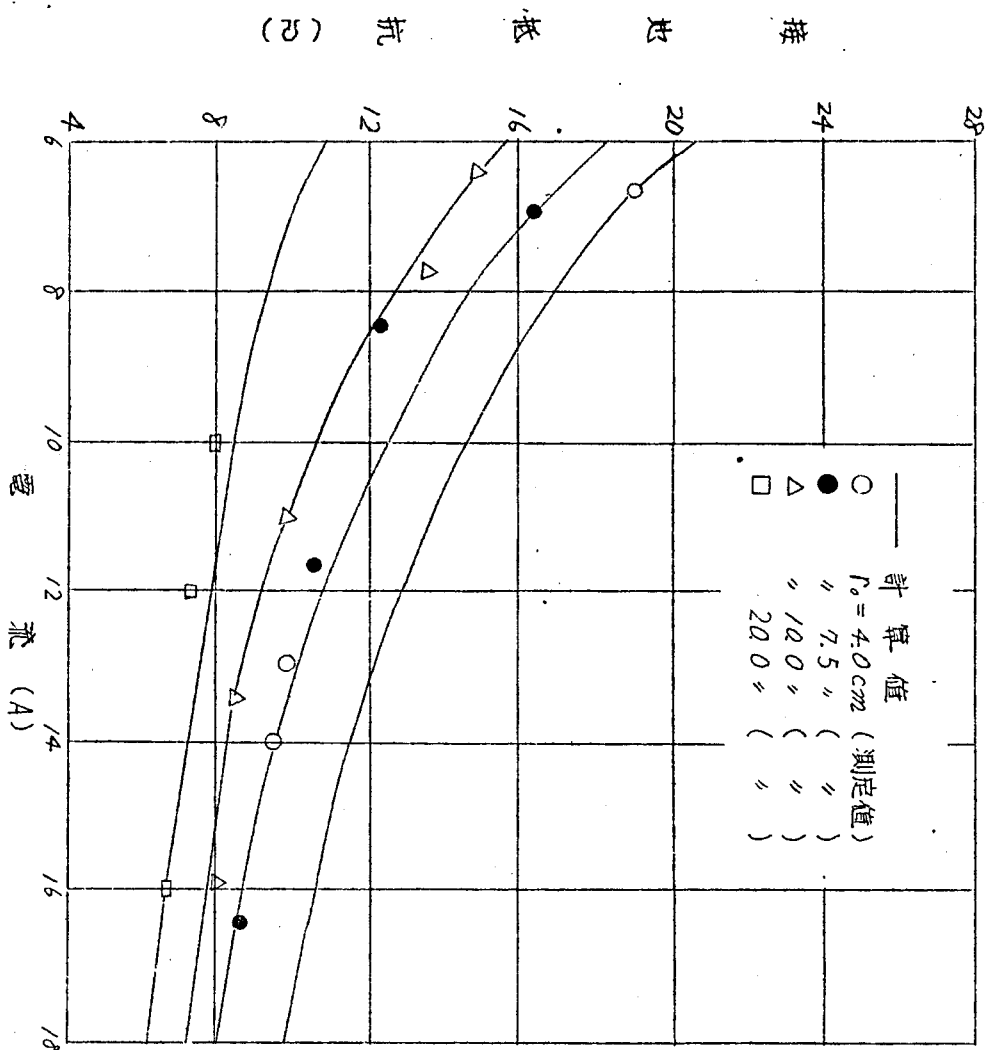
第5-1図 木炭粉混合の土に於いて、電極の直径を変化した場合の接地抵抗

- ① $D = 8 \text{ cm}$
- ② " 10.5 "
- ③ " 15 "
- ④ " 20 "
- ⑤ " 30 "
- ⑥ " 40 "



第5-2図 木炭粉混合の土における*i*-*ρ*特性

第5-3図 木炭粉混合の土に於ける接地抵抗



即ち上式に於ける電流密度は中心より $\frac{1}{2}(\rho_0 + \rho_2)$ に於けるものを平均値として採用している。尚、実測によれば第(5-1)図に於いて電流が12 A以上は各種の電極に対する接地抵抗は殆んど一致してくるが、これは土中ストリーマが発生して等価半径が増大し、中心電極による差異が減少してくるためと考えられる。

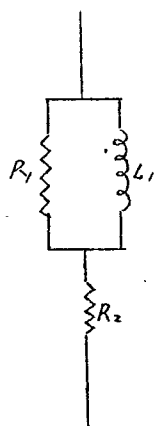
尚、(5-2)図より $a = 0.0015$, $b = 3.6$

この a , b の値を用いて、式(1-20)により計算すれば、5-3図の如くであつて、実験値と計算値とは、比較的良い一致を示す。

第6章 線型素子による接地抵抗の表示

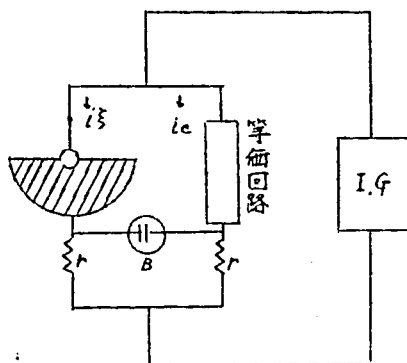
§1 概 説

衝突大電流に対する接地抵抗の時間的変化は、線路上の進行波の変歪、減衰等に影響を与える。従来、第6-1図に示す如き回路により接地抵抗を近似的に線型化することが行われているが、この近似の度合を実験的に確かめるため、第6-2図に示す如きブリッジにより、実際の接地と、その等価回路に流れる電流とを比較しつつ、 R_1 、 R_2 及び L_1 を順次変化しつつ両者の差が最小になる如く、その値を定めた。



第6-1 図

接地抵抗の等価回路



r : 電流用シャント抵抗

B : フラウン管

第6-2図 等価回路の実験

公知の如く接地抵抗は接地電極の形、大きさ、土の比抵抗、印加電圧の大きさ等に変化するから、等価回路もこれらの関数として表示する。

§2 等価回路の解拆

第6-2図に於て、接地抵抗の等価回路（以下単に等価回路と称する）が、接地抵抗を完全に表わすものとし、これを回路素子にて示せば、第6-3図の如くなる。同図の記号により、等価回路両端の電圧 $e(p)$ 及び試料を流れる電流 $i(p)$ は

$$e(p) = \frac{PC_0 \{pL_1(R_1 + R_2) + R_1 R_2\} R_0}{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3} \frac{v^{-0}}{4} \quad (6-1a)$$

$$i(p) = \frac{PC_0 R_0 (pL_1 + R_1)}{a_3 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3} \frac{v^{-0}}{4} \quad (6-1b)$$

$$\text{但し } a_0 = \frac{1}{4} L_0 L_1 C_0 (2R_0 + R_1 + R_2)$$

$$a_1 = \frac{1}{4} C_0 \{L_0 R_1 (2R_0 + R_2) + L_1 R_0 (R_1 + R_2)\}$$

$$a_2 = \frac{1}{4} L_1 (2R_0 + R_1 + R_2) + \frac{1}{4} C_0 R_0 R_1 R_2$$

$$a_3 = \frac{1}{2} R_0 R_1 + \frac{1}{4} R_1 R_2$$

v^{-0} : C_0 の充電電圧（第1種初期値）。

また放電抵抗 R_0 を流れる電流 $i_0(p)$ は

$$i_0(p) = \frac{PC_0 \{pL_1(R_1 + R_2) + R_1 R_2\}}{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3} v^{-0} \quad (6-1c)$$

等価回路の過渡抵抗 r_e は

$$i_e(p) = \frac{e(p)}{i(p)} = \frac{pL_1(R_1 + R_2) + R_1 R_2}{(pL_1 + R_1)} \quad (6-2)$$

§3 等価の程度

第6-1図に示す等価回路に単位函数状の衝電圧を印加すると、時間+0に於てはその抵抗は $R_1 + R_2$ 、時間無限大に於ては R_2 となる。実験に際しては、第9-2図に示す回路に於て、トラウン管Bを覗きつつ R_2 を変化して、印加電圧の波尾に於て、 $i_s = i_e g$ となる如く調整する。次に R_1 , L_1 を変化して波頭部分の調整を行う。その際の印加電圧波形及び電流差波形 ($i_s - i_e$) を第6-4図に示す。同図(d)は等価回路の各素子が最適値を取る際の ($i_s - i_e$) の波形であつて約 $25\mu S$ の間に亘り一致する。この際の素子は

$$L_1 = 4.6 \text{ mH}, \quad R_1 = 429 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 1.3 \text{ k}\Omega$$

となる。

これらの値により式(6-1)に従い計算すれば

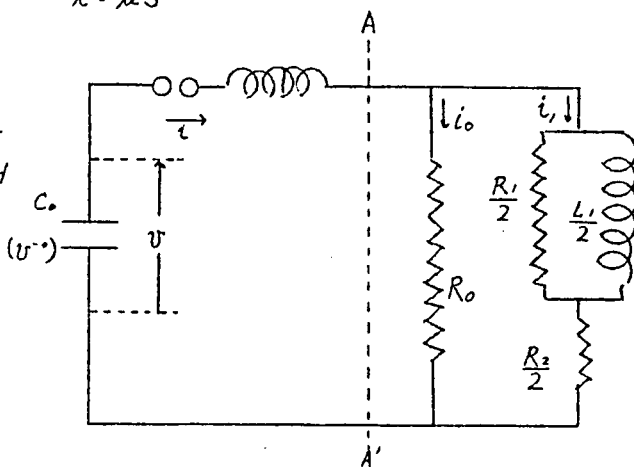
$$I_o(t) = \mathcal{L}^{-1} i_o(p) = (1.87 \cdot e^{-0.014t} - 1.32 e^{-1.08t} - 0.55 e^{-0.106t}) \times 10^{-3} \cdot v^{-0}$$

$$I(t) = \mathcal{L}^{-1} i(p) = (1.85 e^{-0.014t} - 0.049 e^{-1.08t} - 1.80 e^{-0.106t}) \times 10^{-3} \cdot v^{-0}$$

(6-3)

但し $v^{-0} = 55 \text{ kV}$ $t: \mu S$

R_o : I.G.の放電抵抗 610Ω
 L_o : 直列インダクタンス 0.55 mH
 C_o : I.G.の等価容量
 ($0.25 \sim 0.10 \mu F$)



第6-3図 放電回路

これより

$$R_{eq}(t) = \mathcal{L}^{-1} R_{eq}(P) = \frac{2.28 - 1.61 \varepsilon^{-1.066t} - 0.67 \varepsilon^{-0.152t}}{1.85 - 0.049 \varepsilon^{-1.066t} - 1.80 \varepsilon^{-0.152t}} \times 10^3 (\Omega) \quad (6-4)$$

上式を図示すれば第 6-5 図の如くなり。実測値と計算値は良く一致しているといふことができる。また第 6-6 図はこれを等価半径に換算したものである。

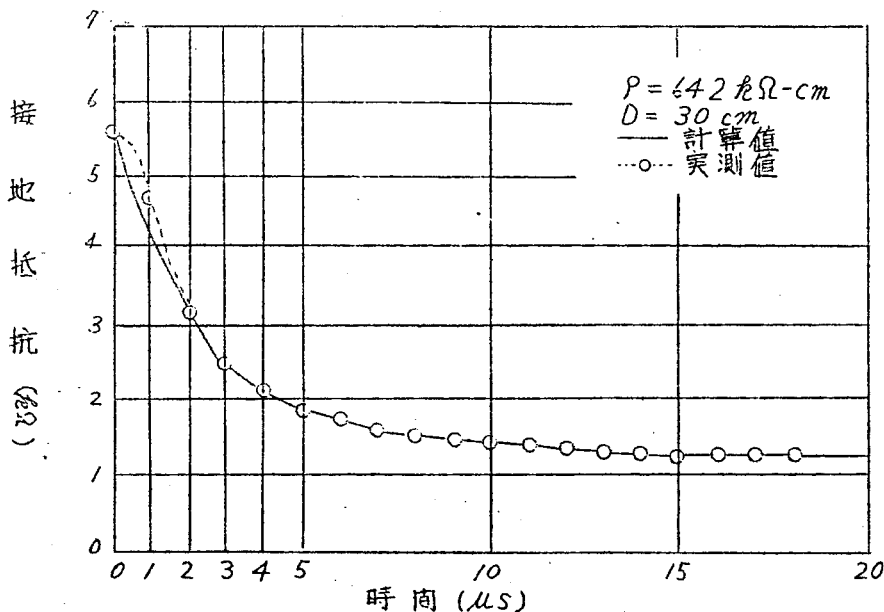
電圧印加より $20 \mu s$ 以後は、等価回路の近似性は失われ、接地抵抗は上昇して定常抵抗値まで回復上昇し、一方等価インピーダンスは減少して R_2 に等しくなる。第 6-7 図、第 6-8 図は同一現象の実測結果を更に長い時間に亘り画いたものである。

尚この際の接地抵抗と等価半径 r_t との関係は

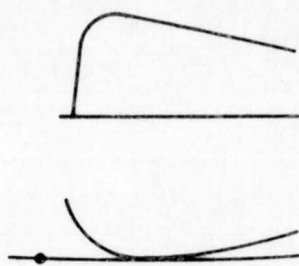
$$r_t(t) = \frac{100}{0.98 R_{eq}(t) + 1.21} \quad (6-5)$$

但し r_c (土の容器の半径) : $83 cm$

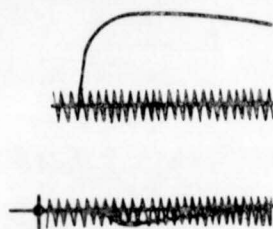
P (土の比抵抗) : $642 k\Omega \cdot cm$



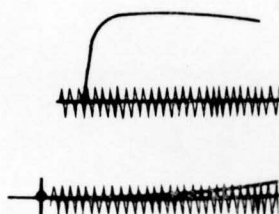
第 6-5 図 接地抵抗の時間的变化



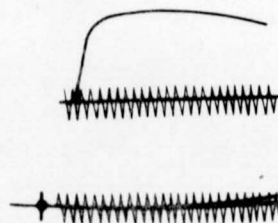
(a) R_2 の調整



(b) $R_1 = 4.29 \text{ k}\Omega$
 $R_2 = 1.30 \text{ } "$
 $L_1 = 6.0 \text{ mH}$ (過大)



(c) $R_1 = 4.29 \text{ k}\Omega$
 $R_2 = 1.30 \text{ } "$
 $L_1 = 3.9 \text{ mH}$ (不足)



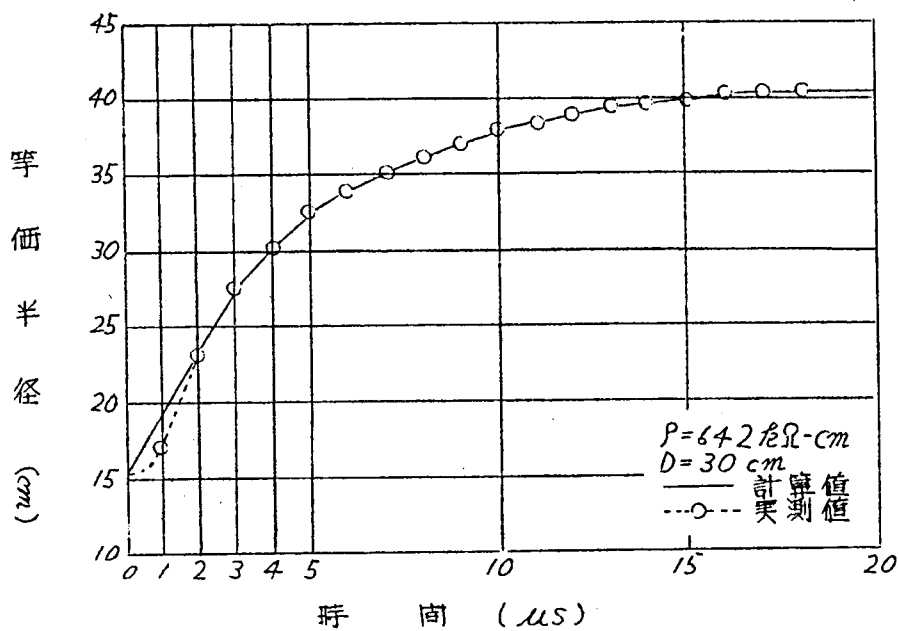
(d) $R_1 = 4.29 \text{ k}\Omega$
 $R_2 = 1.30 \text{ } "$
 $L_1 = 4.6 \text{ mH}$ (適)

第6-4図 接地抵抗の線型素子による近似の 程度の測定

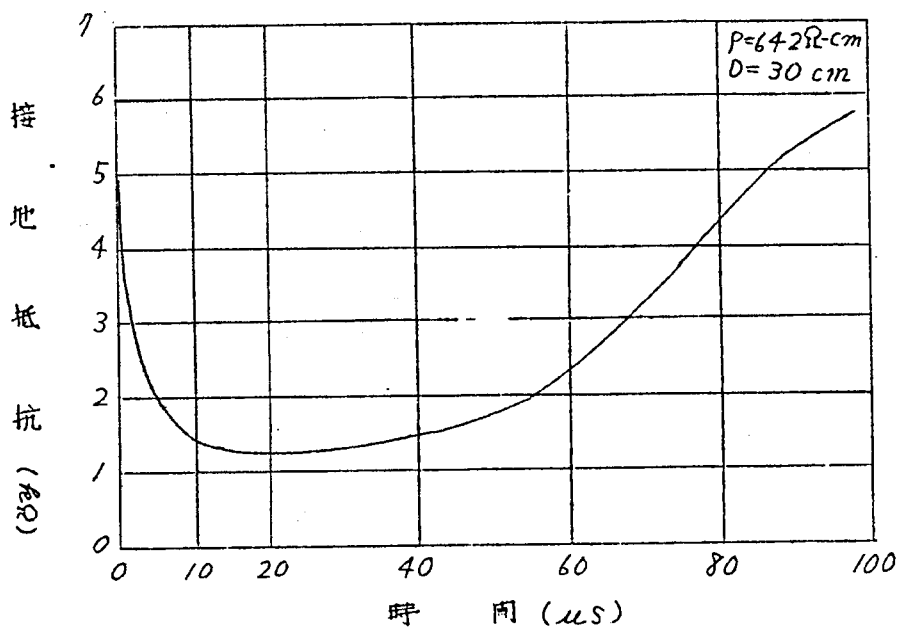
上; 印加電圧波形

下; 電流差の波形 (本文参照)

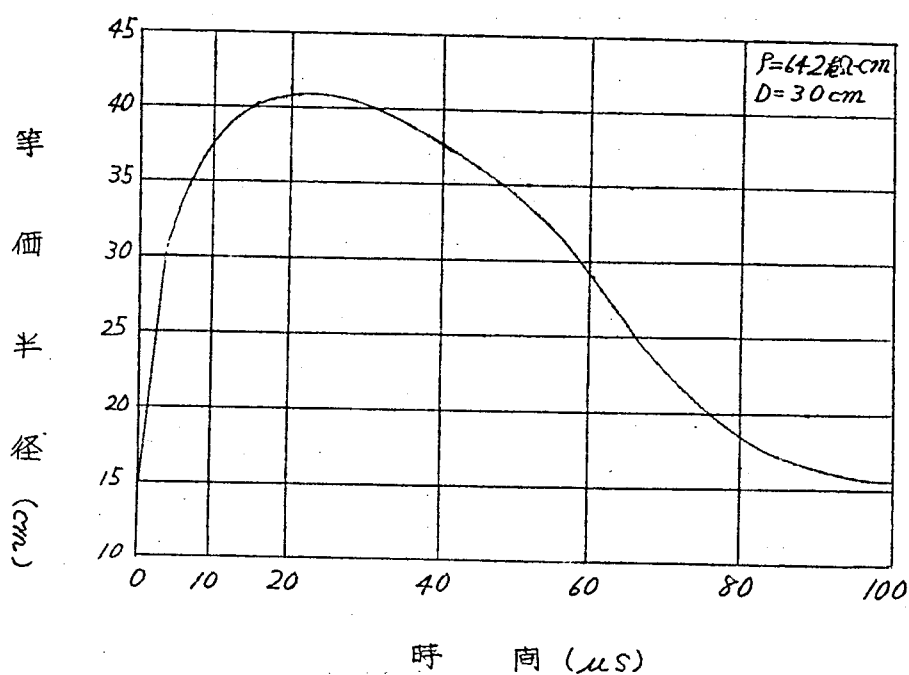
$V = 55 \text{ kV}$, $\rho = 480 \text{ k}\Omega\text{-cm}$, $D = 30 \text{ cm}$,
 時間較正 1000 kC



第 6-6 図 等価半径の時間的变化



第 6-7 図 接地抵抗の時間的变化 (実測値)



第 6-8 図 等価半径の時間的变化 (実測値)

第 9-5 ~ 6 図に示す如く、波頭 $1 \mu s$ 附近で一致を欠くのは、その間に於いて土中ストリーマの発生が多少おくれる為と考えられる。

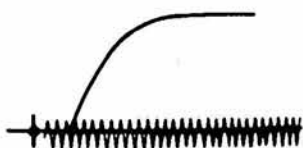
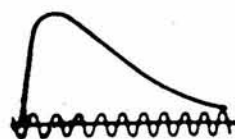
第 6-9 図は I_s と I_{eg} とのオシログラムを比較したものである。

第 6-1 表 線型素子の測定値 (波頭部分 $0 \sim 5 \mu s$)

印加電圧 $65 kV$ $P=137 \Omega \cdot cm$

(a) L_1 (mH)

剣の長さ 電極の直径 cm	0	2	4	8	16
3.5	7.67	7.17	5.85	3.95	2.02
5.0	6.96	6.48	5.33	3.64	1.85
8.0	6.20	5.87	4.82	3.32	1.78
10.5	5.79	5.36	4.40	3.11	1.69
15.0	5.31	4.85	3.88	2.72	1.44



(a) 時間較正 1000 μC

(b) 時間較正 100 μC

第6-9図 I_s と I_{ef} との比較

$\rho = 480 \text{ k}\Omega\text{-cm}$, $D = 30 \text{ cm}$.

$L_1 = 4.6 \text{ mH}$, $R_1 = 1.3 \times 10^3 \Omega$, $R_2 = 1.3 \text{ k}\Omega$

I_m (電流波高値) = 40A

上 ; I_s 下 ; I_{ef}

(b) $R_1 (\Omega)$

刺の長さ 電極の直径 (mm)	0	2	4	8	16
3.5	12.000	10.400	7.600	4.600	1.520
5.0	8.500	7.700	6.100	3.830	1.500
8.0	5300	4.750	3.960	2.800	1.360
10.5	4.200	3.720	3.090	2.210	1.230
15.0	3.630	3.140	2.520	1.790	1.030

(c) $R_2 (\Omega)$

刺の長さ 電極の直径 (mm)	0	2	4	8	16
3.5	490	480	470	440	390
5.0	485	475	460	435	380
8.0	470	460	445	420	370
10.5	455	440	430	405	355
15.0	430	420	405	380	330

(d) $L_1/R_1 (\mu s)$ 波頭部分, $0 \sim 5 \mu s$

刺の長さ 電極の直径 (mm)	0	2	4	8	16
3.5	0.64	0.69	0.77	0.86	1.33
5.0	0.82	0.84	0.88	0.95	1.23
8.5	1.17	1.24	1.22	1.19	1.31
10.5	1.38	1.44	1.42	1.42	1.37
15.0	1.46	1.55	1.51	1.52	1.40

第6-2表 線型素子の測定値 (波尾部分 $3 \sim 40 \mu s$)
 (a) L_1 (mH) 印加電圧 65 kV $\rho = 137 \times 10^3 \Omega \cdot cm$

利の長さ 球の直径 cm	0	2	4	8	16
3.5	5.08	4.69	4.27	3.52	2.40
5.0	4.67	4.30	3.91	3.20	2.33
8.0	4.28	4.28	3.50	2.75	2.02
10.5	3.89	3.89	3.18	2.44	1.81
15.0	3.57	3.57	2.78	2.11	1.67

(b) R_1 (Ω)

利の長さ 球の直径 cm	0	2	4	8	16
3.5	1.880	1.540	1.200	820	530
5.0	1.730	1.420	1.120	780	520
8.0	1.470	1.210	980	740	500
10.5	1.350	1.100	880	680	480
15.0	1.240	1.040	840	630	450

(c) R_2 (Ω)

利の長さ 球の直径 cm	0	2	4	8	16
3.5	670	670	660	650	570
5.0	660	660	650	640	550
8.0	650	650	640	630	540
10.5	640	640	640	620	540
15.0	630	630	630	610	530

(d) L_1/R_1 (μs)

利の長さ 球の直径 cm	0	2	4	8	16
3.5	2.70	3.04	3.56	4.30	4.53
5.0	2.70	3.01	3.41	4.10	4.48
8.0	2.92	3.09	3.57	3.72	4.04
10.5	2.88	3.22	3.62	3.59	3.77
15.0	2.88	3.10	3.31	3.35	4.08

§4 各種の変数に対する素子の変化

前記の如く、等価回路の素子は電圧電極等と共に変化するから、これを実験により測定する。

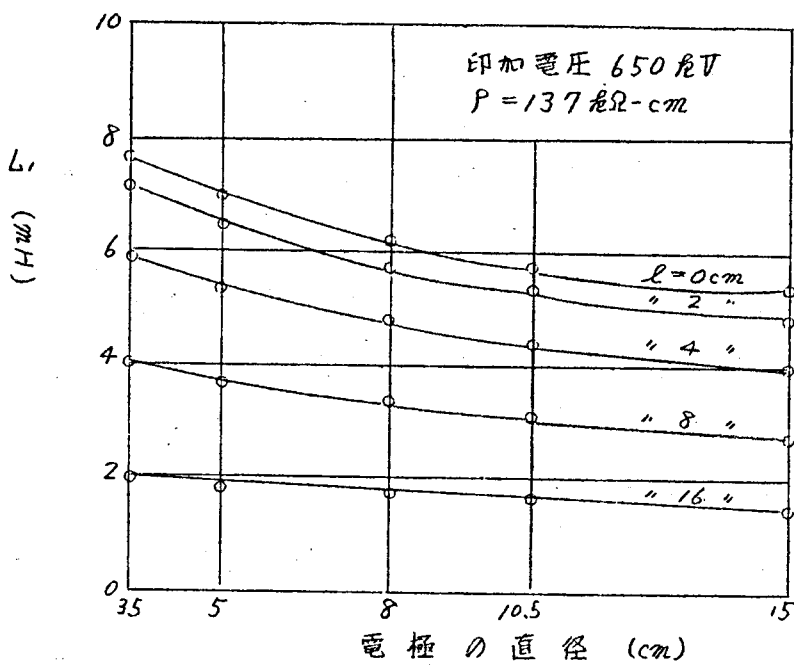
a 有利球状接地電極の取の直径及び刺の長さとの関係

印加電圧を一定にし、取の直径及び刺の長さを変化する場合の各素子の変化は第 6-1, 2 表及び第 6-10~16 図の如くである。

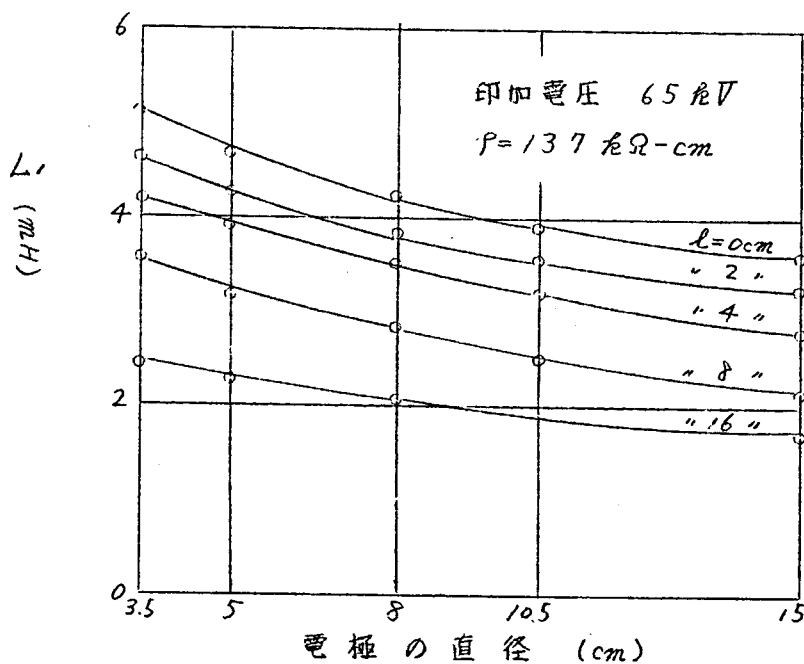
b 印加電圧を変化する場合

更に印加電圧を変化すれば、第 6-3, 4 表、第 6-17~21 図の如くである。

これより明らかな如く、一般に接地電極、刺の長さ及び印加電圧が大となるに従い、 L は減少し過渡抵抗の時定数 (L/R) は減少する。

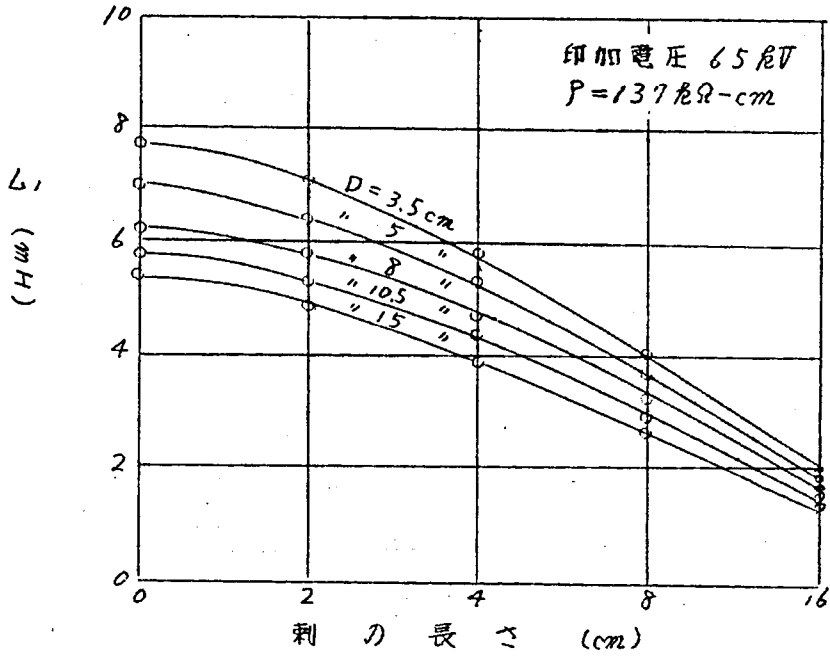


a. 波頭 0~5 μs

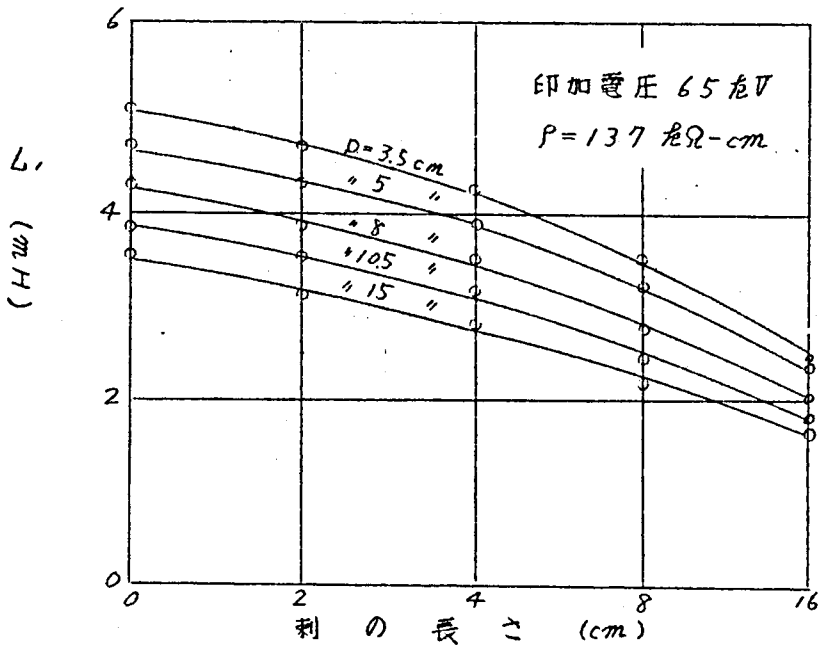


b. 波尾 2~40 μs

第 6-10 図 L_1 と電極の直径との関係

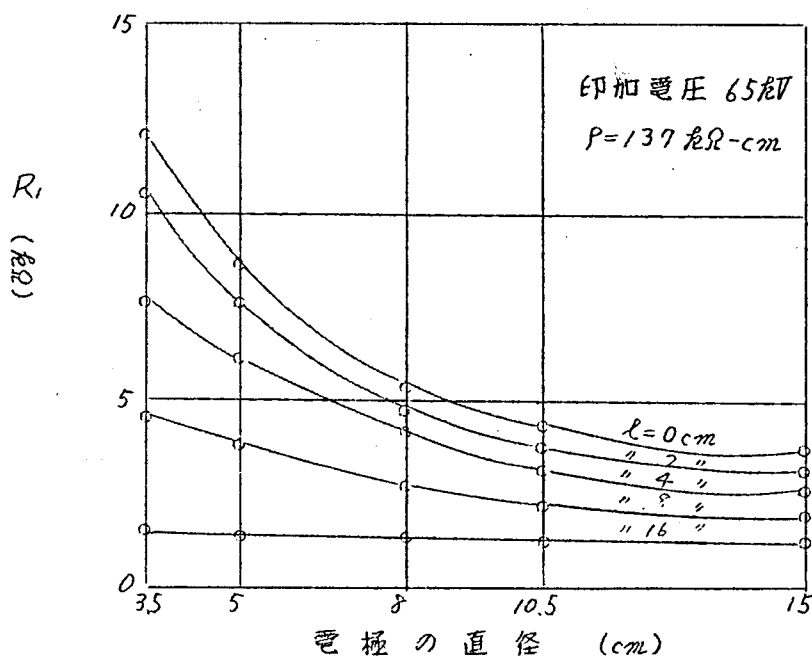


a. 波頭 0 ~ 5 μs

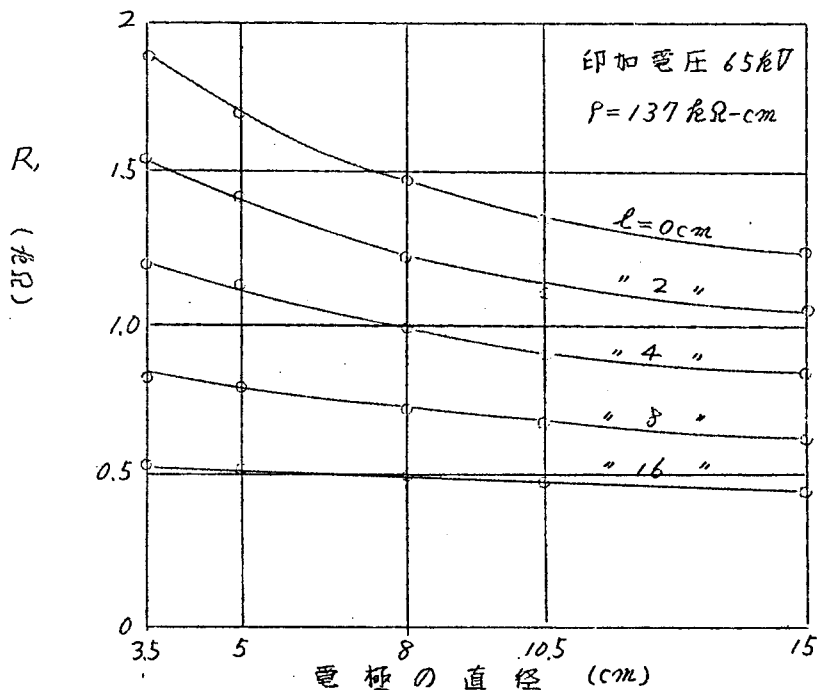


b. 波尾 2 ~ 40 μs

第 6-11 図 L_1 と針の長さとの関係

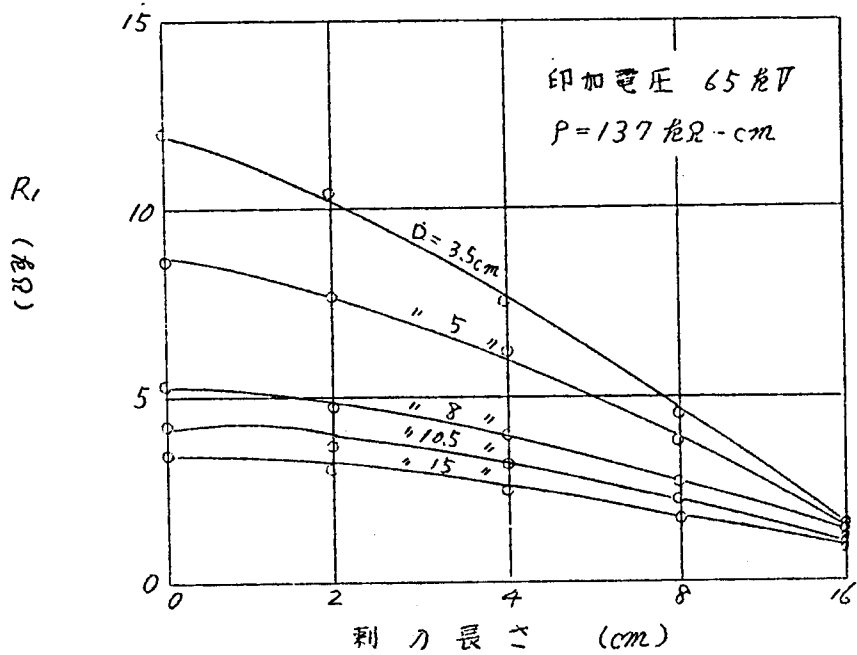


a. 波頭 $0 \sim 5 \mu\text{s}$

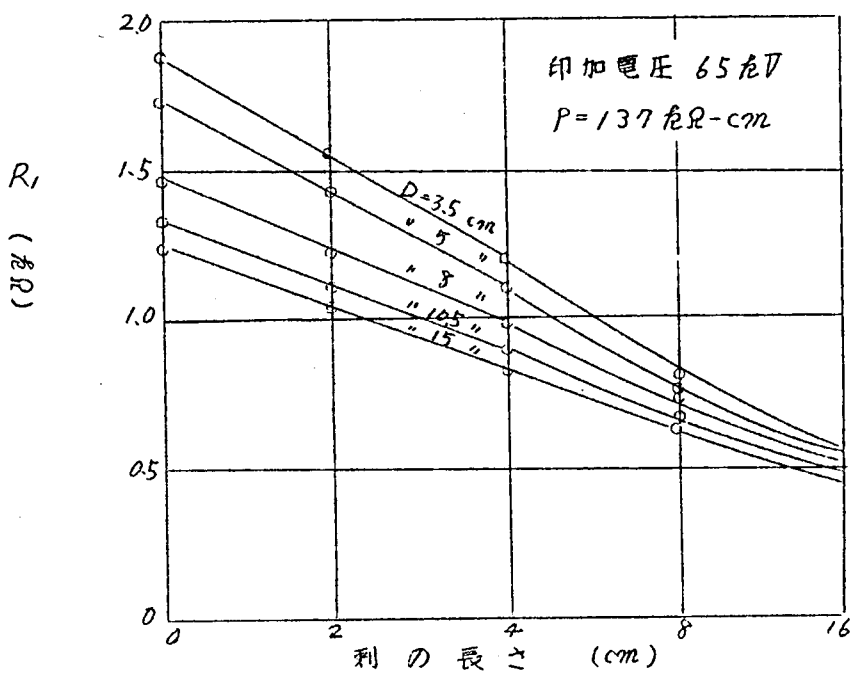


b. 波尾 $2 \sim 4 \mu\text{s}$

第6-12図 R_1 と電極の直径との関係

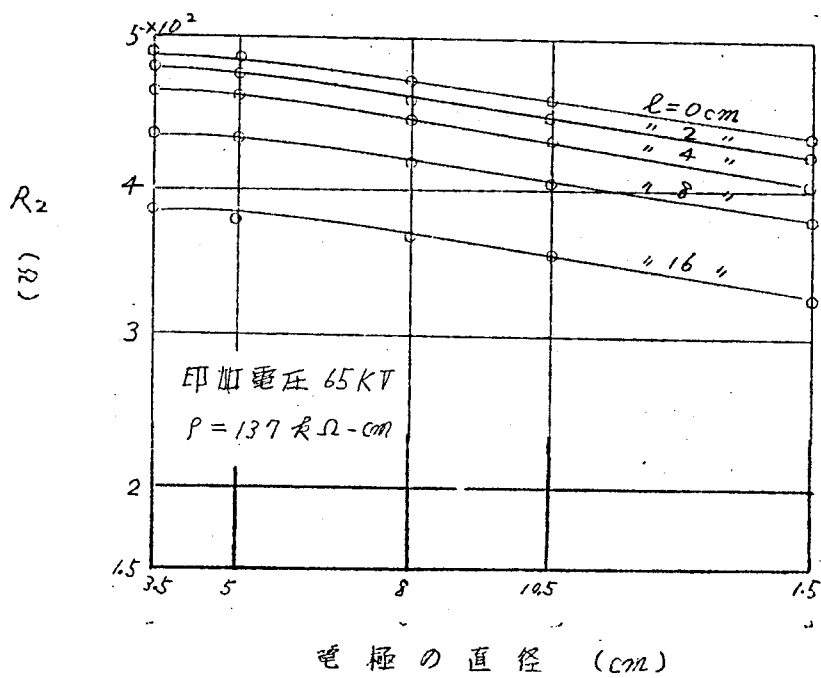


a. 波頭 $0 \sim 5 \mu\text{s}$

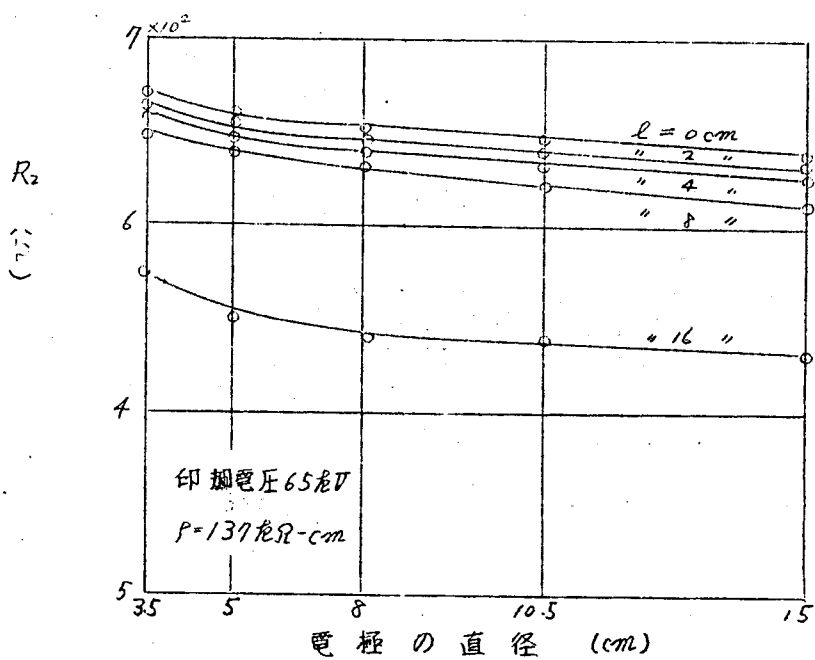


b 波尾 $2 \sim 40 \mu\text{s}$

第 6-13 回 R_1 と利の長さとの関係



a. 波頭 $0 \sim 5 \mu\text{s}$



b. 波尾 $2 \sim 40 \mu\text{s}$

第 6-14 図 R_2 と電極の直径との関係

第 6-3 表 線型素子の測定値 (波頭部 $0 \sim 5 \mu s$)

$$D = 8 \text{ cm}, \quad P = 137 \text{ 乾}\Omega\text{-cm}$$

(a) L_1 (mH)

判の長さ(cm) 印加電圧(kV)	0	2	4	8	16
4 5	∞	∞	∞	7.43	4.18
5 6	9.67	9.05	7.51	5.20	2.88
6 5	6.23	5.72	4.80	3.33	1.70
8 1	4.51	4.08	3.44	2.43	1.49

(b) R_1 (Ω)

判の長さ(cm) 印加電圧(kV)	0	2	4	8	16
4 5	5.200 *	5.200 *	5.200 *	4.000	3.200
5 6	5.300	4.950	4.200	3.300	2.210
6 5	5.200	4.700	4.000	2.800	1.300
8 1	5.100	4.550	3.600	2.300	900

* 印は $(R_1 + R_2)$ の数値

(c) R_2 (Ω)

判の長さ(cm) 印加電圧(kV)	0	2	4	8	16
4 5	—	—	—	950	850
5 6	750	720	650	560	480
6 5	470	460	440	420	370
8 1	360	360	350	340	330

(d) L_1/R_1 (μs)

判の長さ(cm) 印加電圧(kV)	0	2	4	8	16
4 5	∞	∞	∞	1.86	1.32
5 6	1.83	1.83	1.79	1.58	1.30
6 5	1.20	1.22	1.20	1.19	1.31
8 1	0.89	0.90	0.95	1.06	1.66

第 6-4 表 線型素子の測定値 (波尾部分 3 ~ 40 μ S)

$$D = 8 \text{ cm}, \quad P = 137 \text{ } \Omega\text{-cm}$$

(a) L_1 (mH)

判り長さ (cm) 印加電圧 (kV)	0	2	4	8	16
45	∞	∞	∞	7.25	4.36
56	7.47	7.01	5.79	4.30	2.47
65	4.28	3.87	3.50	2.73	2.04
81	3.42	3.18	2.84	2.30	1.75

(b) R_1 (Ω)

判り長さ (cm) 印加電圧 (kV)	0	2	4	8	16
45	5.200 *	5.200 *	5.200 *	2,500	1,210
56	4,100	3,350	2,400	1,400	610
65	1,470	1,220	990	770	500
81	1,280	1,100	890	680	430

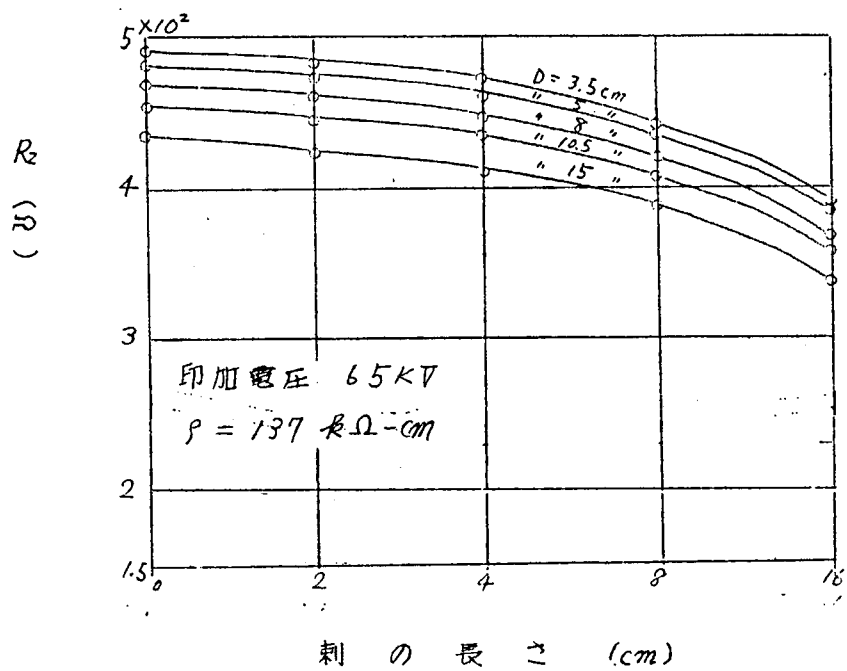
*印は ($R_1 + R_2$) の数値

(c) R_2 (Ω)

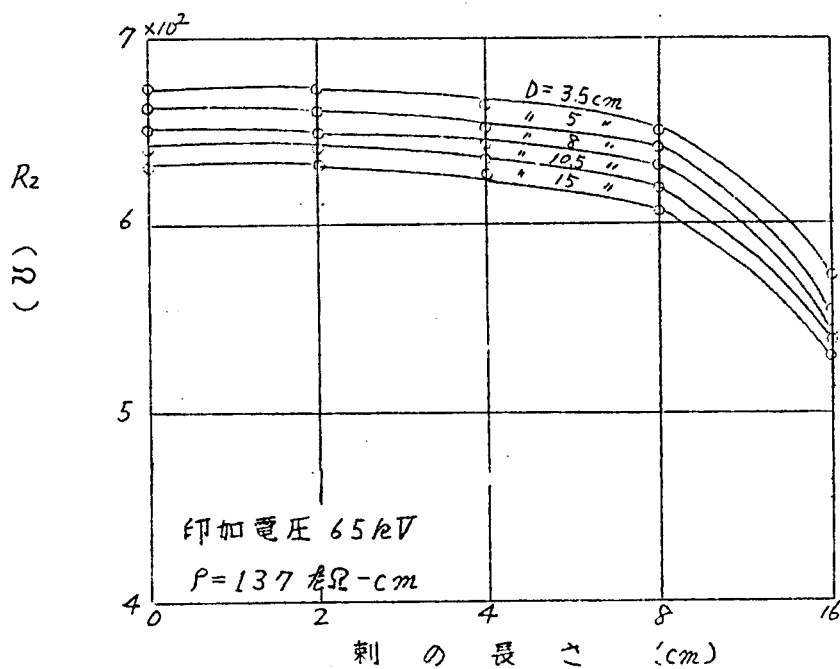
判り長さ (cm) 印加電圧 (kV)	0	2	4	8	16
45	—	—	—	1,470	1,190
56	940	920	890	850	220
65	650	650	630	620	550
81	500	490	480	470	450

(d) L_1/R_1 (μ S)

判り長さ (cm) 印加電圧 (kV)	0	2	4	8	16
45	∞	∞	∞	2.90	3.61
56	1.82	2.92	2.37	3.07	4.05
65	2.92	3.09	3.54	3.55	4.08
81	1.22	2.89	3.19	3.38	4.07

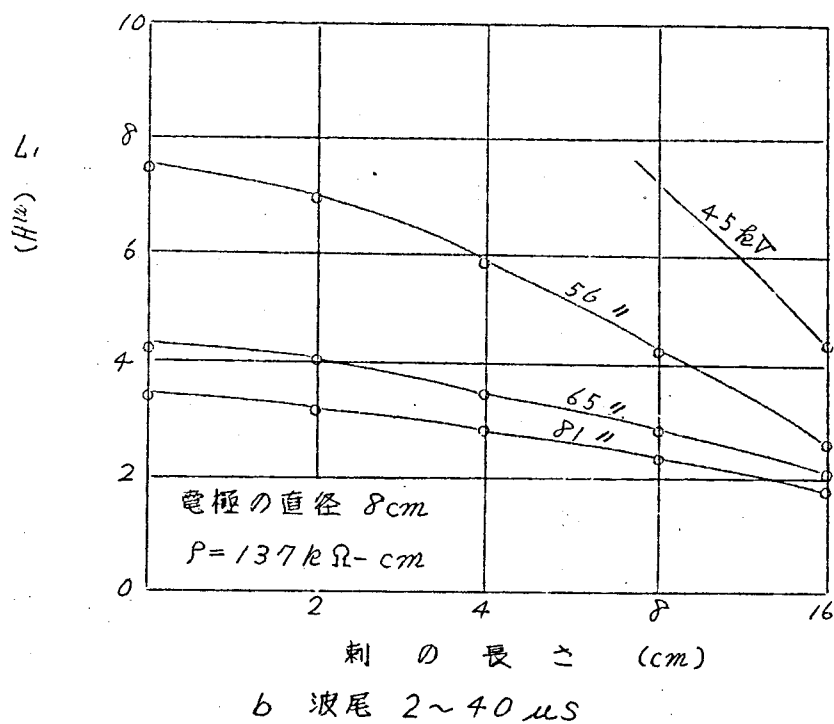
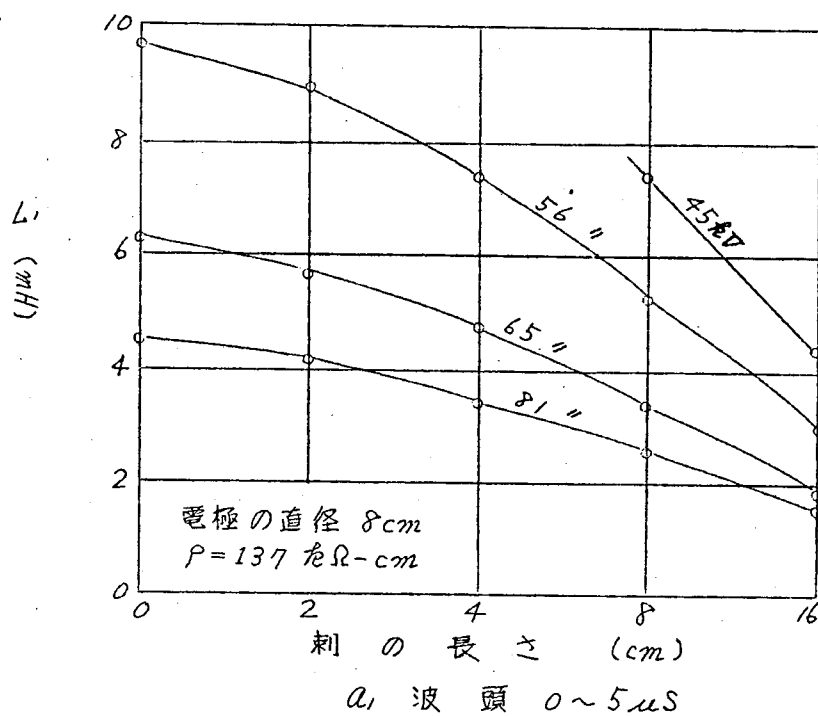


a. 波頭 $0 \sim 5 \mu\text{s}$

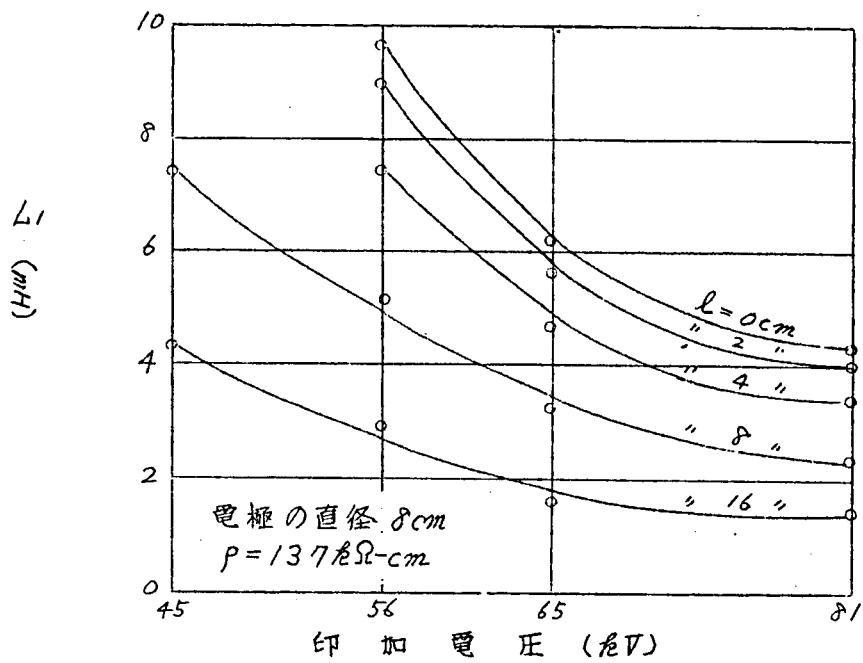


b 波尾 $2 \sim 40 \mu\text{s}$

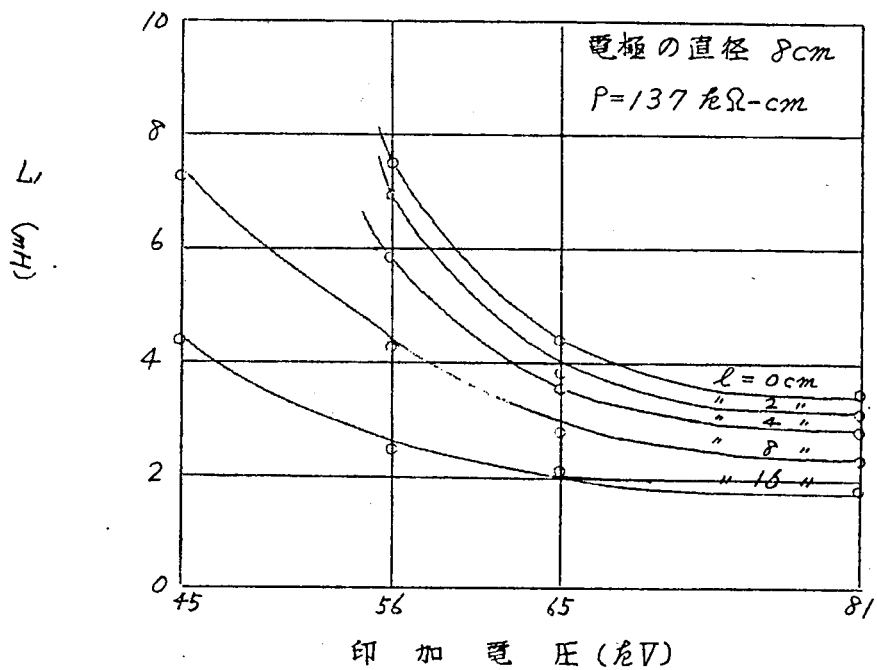
第 6-15 図 R_2 と 刺の長さ と の 関 係



第 6-16 図 L_1 と刺の長さとの関係

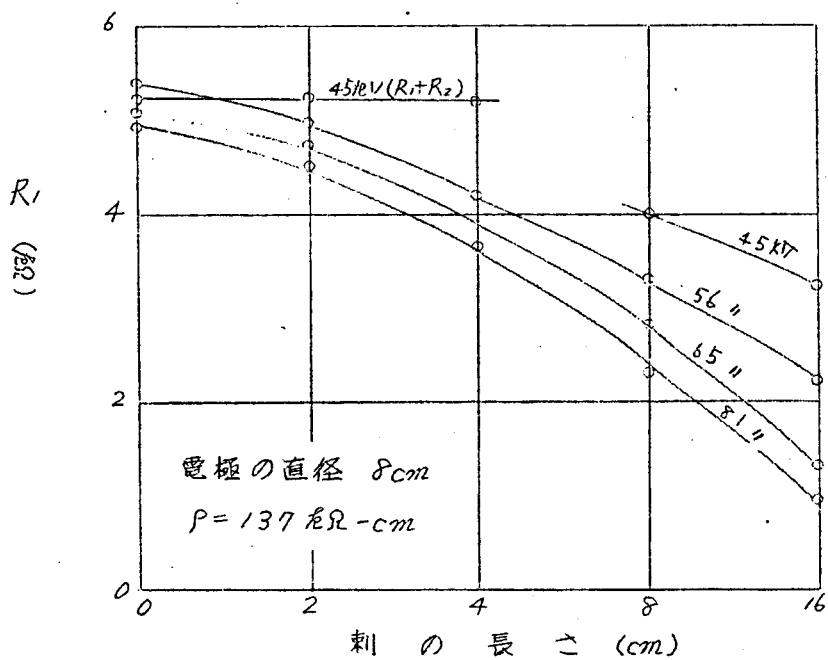


a 波頭 $0 \sim 5 \mu\text{s}$

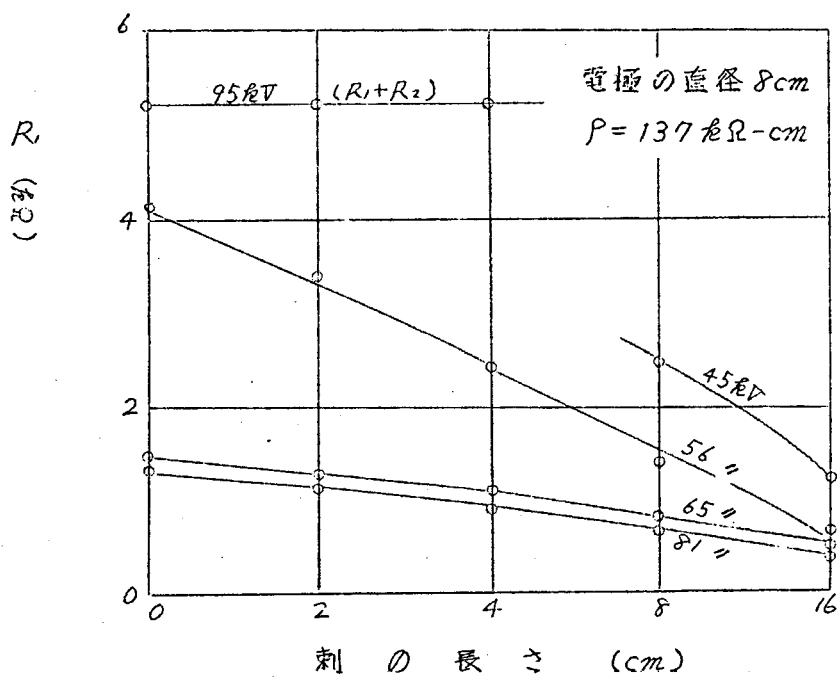


b 波尾 $2 \sim 40 \mu\text{s}$

第 6-17 図 L_1 と印加電圧との関係

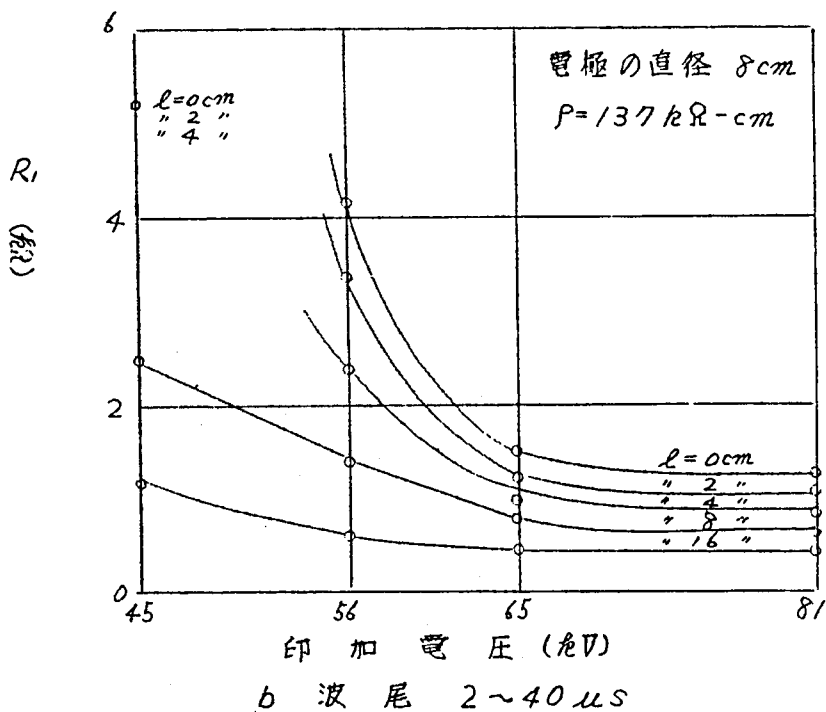
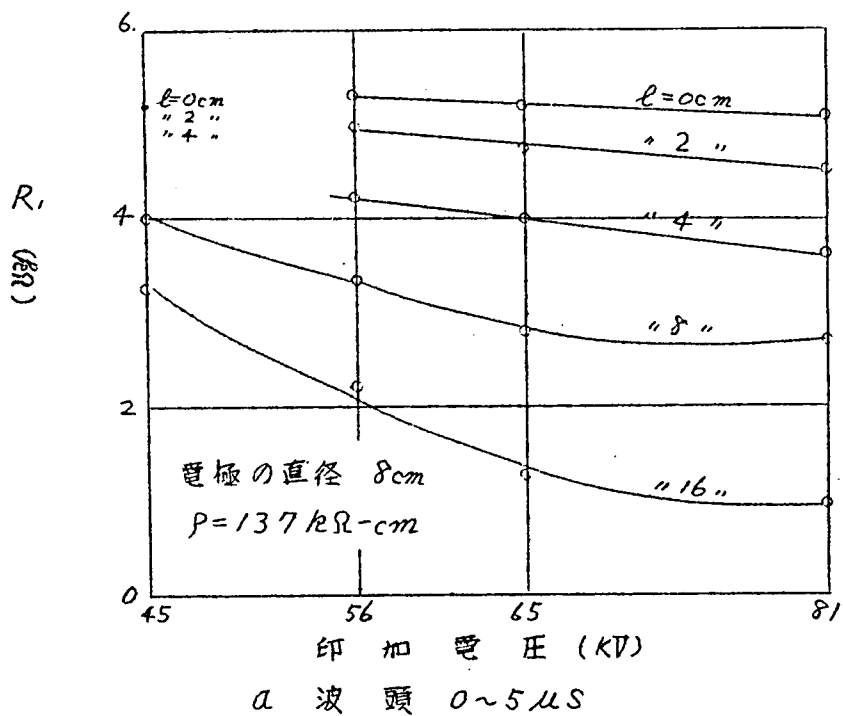


a 波頭 0~5 μ s

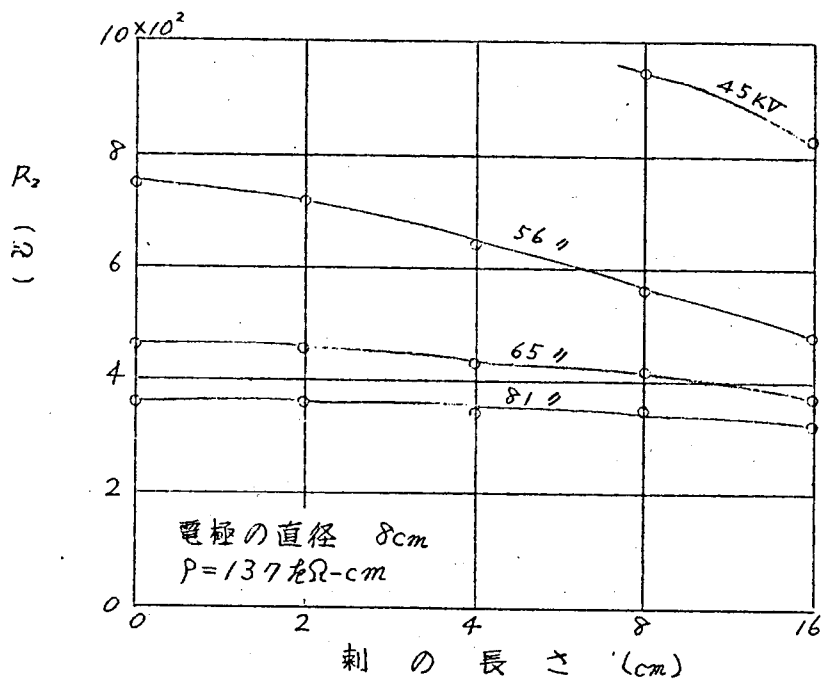


b 波尾 2~40 μ s

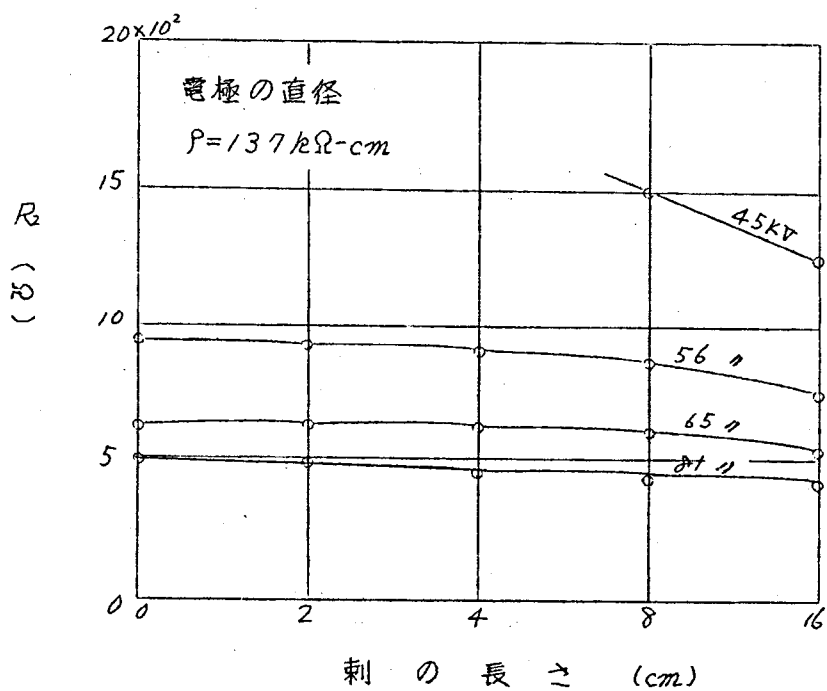
第 6-18 図 R と刺の長さとの関係



第6-19 図 R_i と印加電圧との関係

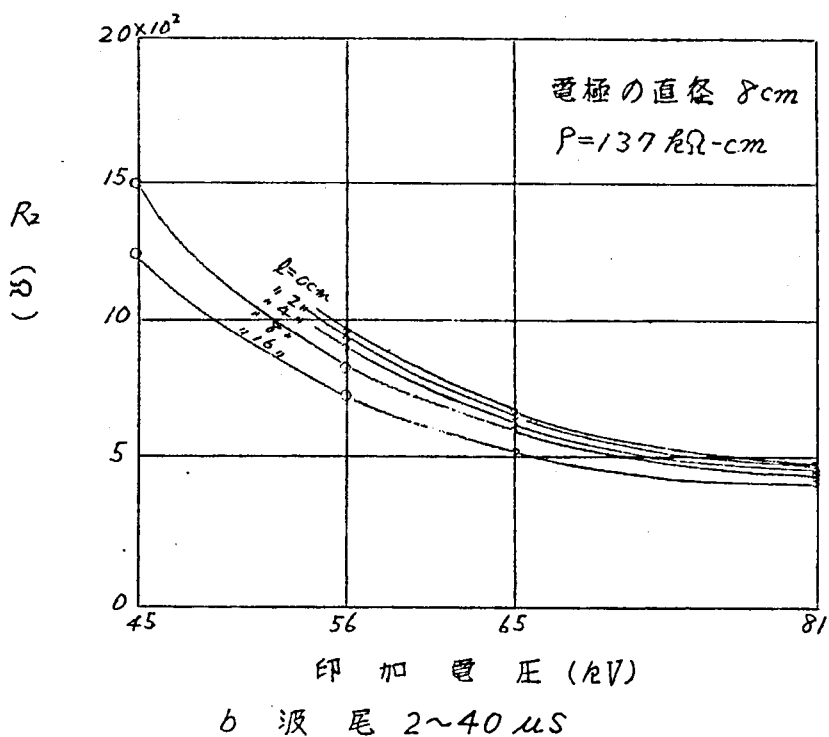
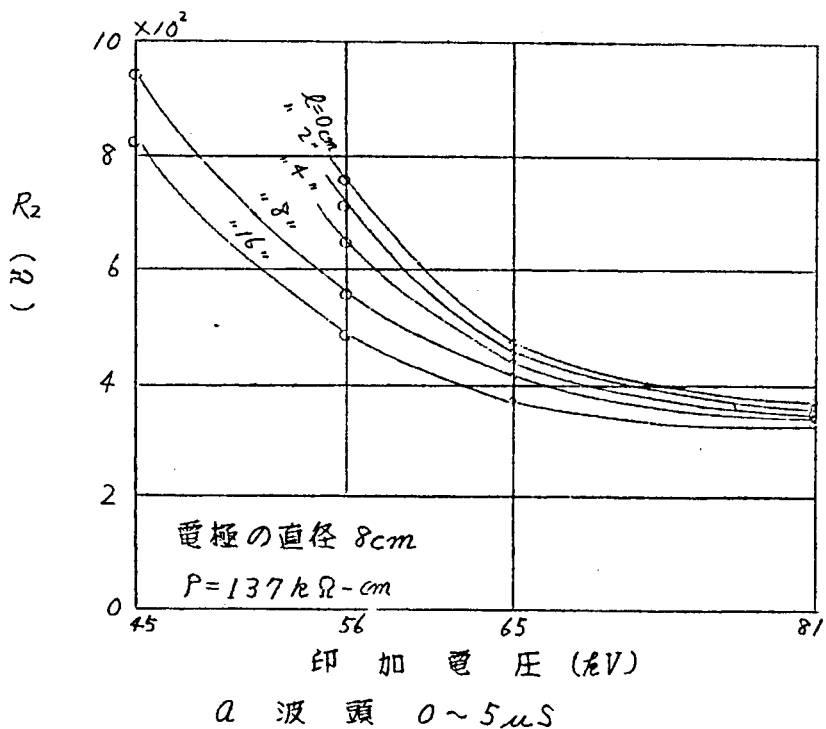


a 波頭 0~5 μ s



b) 波尾 2~40 μ s

第 6-20 図 R_2 と 刺の長さ との 関係



第 6-21 図 R_2 と印加電圧との関係

§5. 考 察

印加電圧 E 及びこれに対する接地電流 I を次式の如く仮定する。

$$E = E_0 (\varepsilon^{-\alpha_1 t} - \varepsilon^{-\alpha_2 t})$$

$$I = I_0 (\varepsilon^{-\beta_1 t} - \varepsilon^{-\beta_2 t}) \quad (6-6)$$

上式より、温度抵抗 $z(p)$ は

$$z(p) = \frac{\mathcal{L} E(t)}{\mathcal{L} I(t)} \quad (6-7)$$

$$\text{但し } \mathcal{L} E(t) = e(p) = E_0 \left(\frac{p}{p + \alpha_1} - \frac{p}{p + \alpha_2} \right)$$

$$\mathcal{L} I(t) = i(p) = I_0 \left(\frac{p}{p + \beta_1} - \frac{p}{p + \beta_2} \right)$$

$$\therefore z(p) = R_1 + \frac{1}{C_1 p + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{L_1 p + R_3}} \quad (6-8)$$

$$\text{但し } R_1 = \frac{E_0}{I_0} \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\beta_2 - \beta_1}$$

$$C_1 = \frac{1}{R_1 (\beta - \alpha)}$$

$$R_2 = \frac{R_1 - (\beta - \alpha)}{\alpha - C}$$

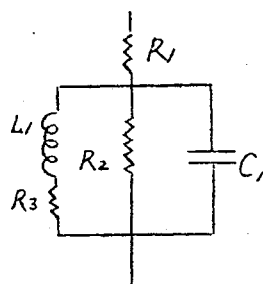
$$L_1 = \frac{(\beta - \alpha) R_1}{A^2 + C(\alpha - C)}$$

$$R_3 = \frac{(\beta - \alpha) R_1 C}{A^2 + C(\alpha - C)}$$

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$$

$$\beta = \beta_1 + \beta_2$$

$$\alpha_1 \alpha_2 = A^2$$



第 6-22 図

正確な等価回路

$$\beta_1 \beta_2 = \beta_2$$

$$\frac{B^2 - A^2}{\beta - \alpha} = C$$

従ってこの仮定のもとでは、第6-22図に示す如き回路によればより正確な等価抵抗が得られることとなる。しかし前期の第6-1図に示す回路比、簡単で且つその等価の程度も比較的正確で、実用上差支えない矣においてすぐれているものと言うことが出来る。

第 1 部 の 総 括

第1部の研究結果を要約すれば次の如くである。

- (1) 式(1-9)より明らかなる如く、利状接地電極の先端の電位傾度は大きく、電圧印加に際して電極周辺の土が電気破壊を生ずる可能性が大きい。
- (2) 衝電電流に対する接地抵抗の低減効果は、主として土中ストリーマの発生により接地電極の実効面積が増加するためである。
- (3) 衝電電圧発生装置の蓄電器の段数を変化することにより、発生電圧を大巾に変化することが出来る。但しこの場合の電圧波形、特に波尾長の変化は、式(1-20)により算定することが出来る。
- (4) 蓄電器の充電電圧が低い時は衝電電圧発生装置は起動が困難であるが、放電間隙の第1段目に刃形電極を使用すれば、その衝電比が1より小なることにより起動が容易、確実となる。
- (5) 第2-6図に示す如き回路を使用すれば、任意の截断時間を有する截断波を作ることが出来る。
- (6) 中心電極に対して適當な大きさの土壌容器を使用すれば、室内にて接地抵抗の測定が可能となり、且つ土質、土の含水率等を隨意に変化することが出来る等種々の呉て便利となる。
- (7) 土の比抵抗、破壊電位傾度、土中の火花の遅れを測定して、実験式または図表にて示す。

- (8) 水の破壊電位傾度、水中の火花の遅れを測定し、図表にて示す。特に後者は $50 \sim 60 \mu S$ で他の絶縁物に較べてかなり大きい。
- (9) 接地電極直下にX線フィルムを埋設することにより、衝電圧印加の際電極周辺に発生する土中ストリーマの像を撮影することが出来る。
- (10) 埋設フィルムによるストリーマ像を観察し
- 土の比抵抗 (ρ) が $2 \text{ } \Omega\text{-cm}$ の附近では、ストリーマは中心電極と同心球状に形成され、その大きさは *Peteropoulos* 氏が提案した接地電極の等価半径に略々等しい。
 - ρ が $30 \text{ } \Omega\text{-cm}$ 附近では、ストリーマは樹枝状に進展し、その長さは等価半径に対応しない。
 - 波高値一定の下に衝電圧の波尾長が長くなれば、ストリーマは大きく進展する。
 - 埋設フィルムを穿孔して像の真偽を検討した結果、埋設フィルム上に得たストリーマ像は正しいものと考えられる。
- (11) 腕状の中同補助電極を使用することにより
- 土中ストリーマの到達距離及び平均進展速度を測定し、これを図表に示す。
 - これらの測定値は電流波高値 I と土の比抵抗 ρ との積 $I \cdot \rho$ を変数として採用することにより、表示が簡明となる。
- (12) 埋設フィルムと截断波を併用して土中ストリーマの成長を観察し、
- ストリーマは始め、中心電極と同心的に球状に発生し、其の後樹枝状に進展する。
 - ストリーマの進展速度は電圧印加後の時間に反比例する。
- (13) 土の比抵抗が電流密度により変化する際は
- 土中ストリーマが発生しない場合でも接地抵抗の低減効果が現われ、第5-3図に示す如き特性を持つ
- (14) 衝電流に対する接地抵抗を簡単な線型回路にて等価的に表わすことの可能性、その近似の程度、並びに印加電圧または電極を種々変えた場合に対する等価回路の構成素子及び時定数の変化を実験により測定した。

これによれば、印加電圧及び電極の大きさ、また有刺電極においてはその刺の長さが増加すれば、回路のインダクタンス及び呼定数は減少する。

第Ⅱ部 接地抵抗の低減

内容梗概

第Ⅰ部に記せるごとき、土中ストリーマの特性に従い、接地電極に針金の刺を附して、電極周辺の電界を歪ませることにより土中ストリーマの進展を時間的に早く、空間的に大きくして、衝電流に対する接地抵抗の低減効果を促進すること、及びコンクリートに種々の添加物を混入し、衝電流に対し、その抵抗を低減し、鉄塔コンクリート基礎の接地抵抗低減に寄与する実験につき記する。

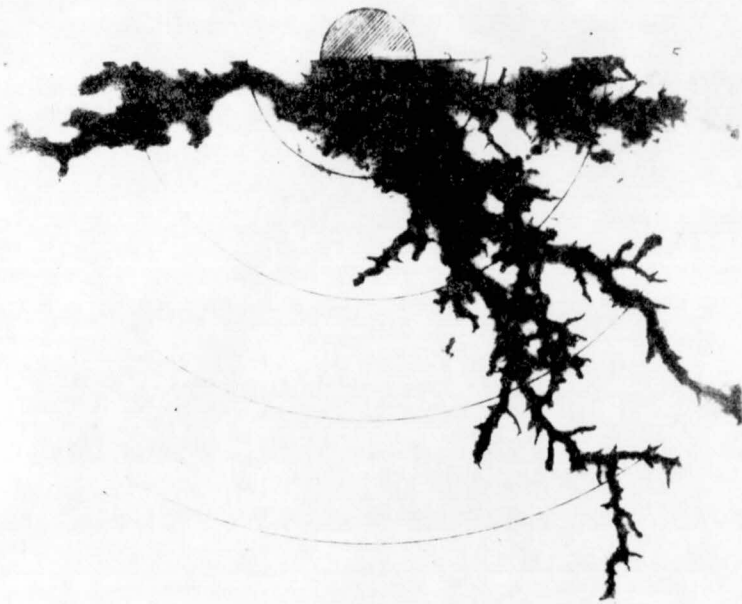
第7章 有刺電極の接地抵抗

§1 概 説

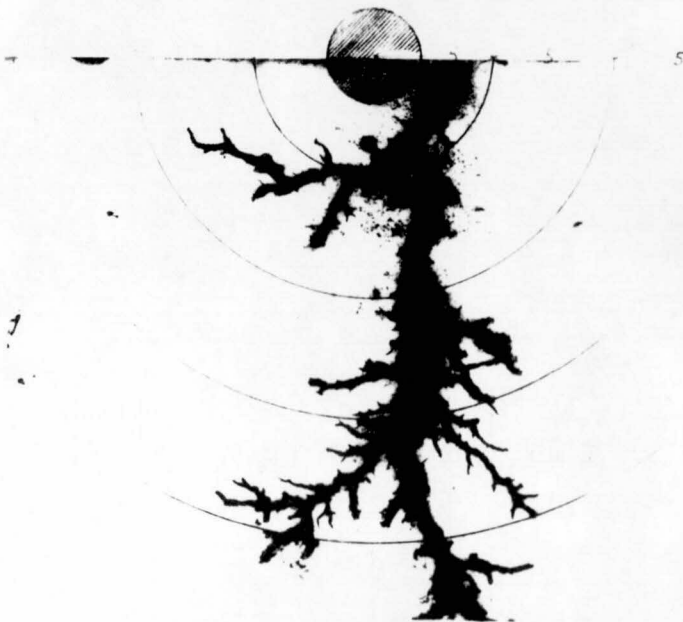
衝電流に対する接地抵抗の低減効果が、接地電極より発生する土中ストリーマに負うものであるれば、接地電極に針金の刺を附し、その周辺の電界に歪みを与えて局所的に電界を強め、これより土中ストリーマの発生を時間的に早く、空間的には大きくして低減効果を高めることが考えられる。

既に外国に於いて、*H. Norinder* が $1\sim 5\text{mm}$ の長さの刺を附せる有刺埋設地線に対し、無刺埋設地線と比較しつつその抵抗低減の度合を測定した例³⁾があるが、予想に反し、刺の効果は極めて微弱であり、むしろ地線の周囲に木炭粉又は酸化鉄粉を配置する方が、効果があるという結論に到達している。

しかし乍ら、接地電極に附した刺の効果は、土の比抵抗、刺の長さ、本数、接地電極の形状及び大きさ、印加電圧（又は電流）の波高値、及び波形等により多岐に変化するものであって、*Norinder* の試験はたま

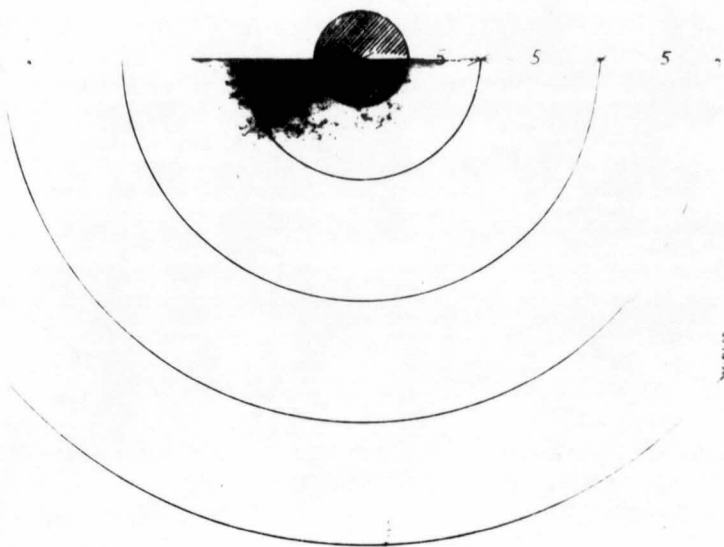


(a) 刺なし

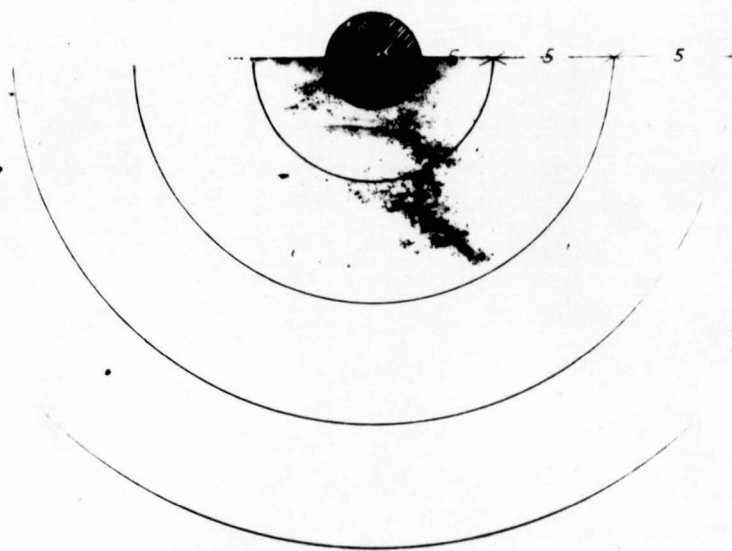


(b) 刺 1.4 cm 1本

第7-2図 無刺及び有刺球状電極より発生する土中ストリーマの比較
 (其ノ一) $\rho = 30 \text{ K}\Omega\text{-cm}$
 $V = 55 \text{ KV}$
 $r_0 = 2 \text{ cm}$



(a) 刺なし



(b) 刺1.4cm 1本

第7-3図 無刺及び有刺球状電極より発生する土中ストリーマの比較
 (其ノ二) $\rho = 30 \text{ K}\Omega\text{-cm}$
 $V = 48 \text{ KV}$
 $r_0 = 2 \text{ cm}$

たま刺の効果が見れない条件下で行なわれたものであると考えられる。本章に於ては、これらの各種パラメータにつき実験した結果を記する。

§2 有刺電極より発生する土中ストリーマ像

接地電極の直下に、四ッ切の×線直接撮影用フィルムを埋設して得られるストリーマ像より、その形状、大きさ等を測定し、刺とストリーマとの関係から刺と接地抵抗との関係を調べる。

a. 直径4cmの有刺球状電極

第7-1図に示す如き球状電極に於いて、1.4cmの刺が一本、印加電圧が55kVの場合、第7-2図(a)、(b)に示す如く刺の有無に拘らず同様に大きなストリーマが発生する。図上の数字はcmを表わすから、ストリーマの長さば25cm程度となり、刺の長さとは比較にばらぬ程長大である。

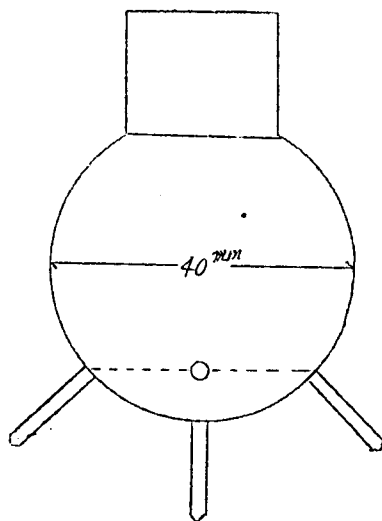
また電圧を10%低下し、48kVを同一の条件下に印加し、第7-3図(a)、(b)を得た。この時、ストリーマは両着とも殆んど発生せず、従って接地抵抗の低減効果には差異を生じない。

これより明らかば如く、刺によりストリーマの発生に差異を生じ、接地抵抗の低減に変化が見れるのは、この条件下では48~55kVの中間の電圧に於いてのみであって、実際問題としては差を見出すことは困難である。

b. 直径4cmの有刺円錐状電極

こゝで使用した円錐電極は長さ約10

cmであって終端よりストリーマが発生するのを防ぐため、丸みを



第7-1図
有刺球状電極の1例

つけてある。印加電圧が 38 kV の場合、無刺電極においては、第 7-4 図 (a) に示す如く、ストリーマは電極と同心的な円坪状を以て拡がり、第 1-5 図 (b) に示せる如き仮定が成立している。この電極の長さ $5 \sim 10 \text{ cm}$ の刺 1 本を附けると、第 7-4 図 (b), (c) に示す如き、樹枝状のストリーマが余分に発生している。これは刺の効果であつて、これにより接地抵抗の低減効果は増加する。

この場合、印加電圧、土の比抵抗等は同一の条件のままに刺の長さを増すと、同図 (c) に示す如くストリーマの進展は更に大きくなり、刺の効果は増大することが判る。

C. 直径 $\phi \text{ cm}$ の有刺球状電極

前項 (a) 及び (b) より明らかな如く、刺を附する以前の電極の大きさ、形状により、刺の効果は大きく変化し、また印加電圧の大きさもこれに關与する。第 7-5 図 (a) 及び (b) は、刺の有無がストリーマ発生に与える影響を示す。

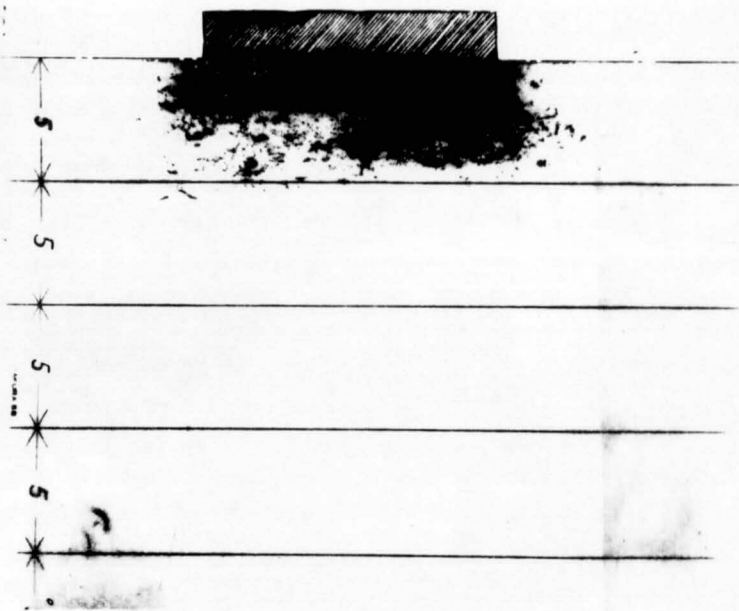
即ち球状電極に於ては、前記の如く、直径 4 cm の場合には、その効果は殆んど認められなかつたが、直径 $\phi \text{ cm}$ の場合には、その効果は明瞭である。³²⁾

d. 数本の刺を附せる有刺円坪状電極

前記の如く、刺の長さとともにストリーマの成長は大となるが、刺の本数を変化する場合の状態は第 7-6 図に示す如くであつて、同一条件下に刺を 1, 2 及び 4 本と順次増加すると、1 本と 2 本の差は大きい。それ以上は大きな変化を齎さない。これより明らかな如く、土中ストリーマの成長を促すためには、刺の配置を密にするよりも、刺の長さを増した方が効果がある。

§ 3 有刺電極の接地抵抗の測定

第 2 章に記せる如き装置により、直径が $3.5 \sim 15.0 \text{ cm}$ の各種の球状電



(a) 刺なし



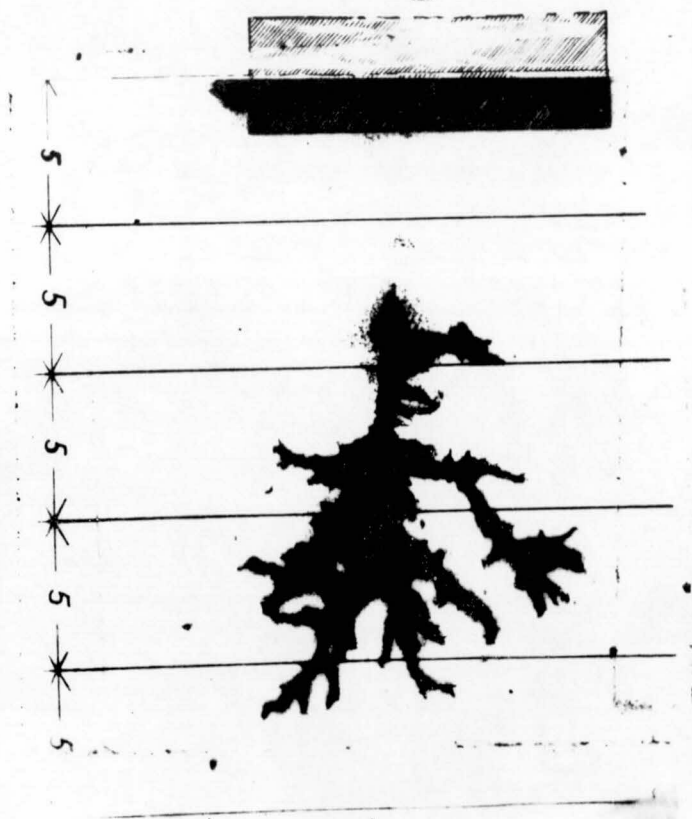
(b) 刺 5 cm 1 本

第7—4図 無刺及び有刺円壩状電極より
発生する土中ストリーマの比較

$$\rho = 30 \text{ K}\Omega\text{-cm}$$

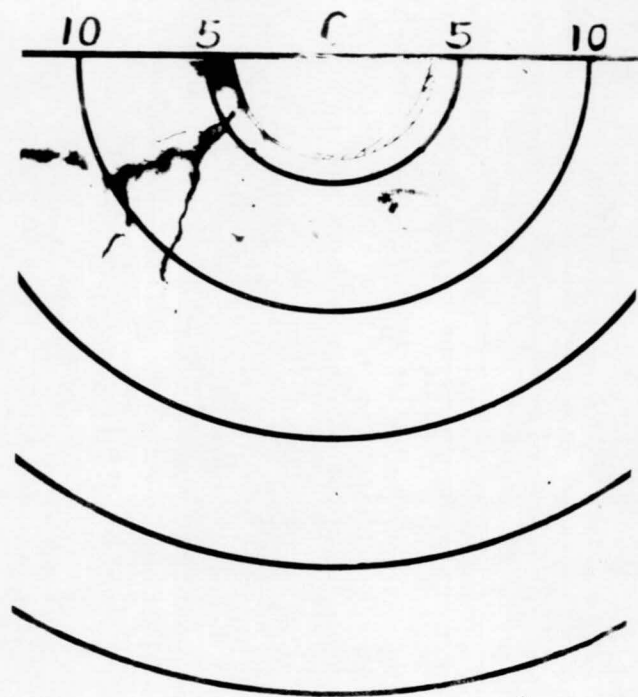
$$V = 38 \text{ KV}$$

$$r_0 = 2 \text{ cm}$$

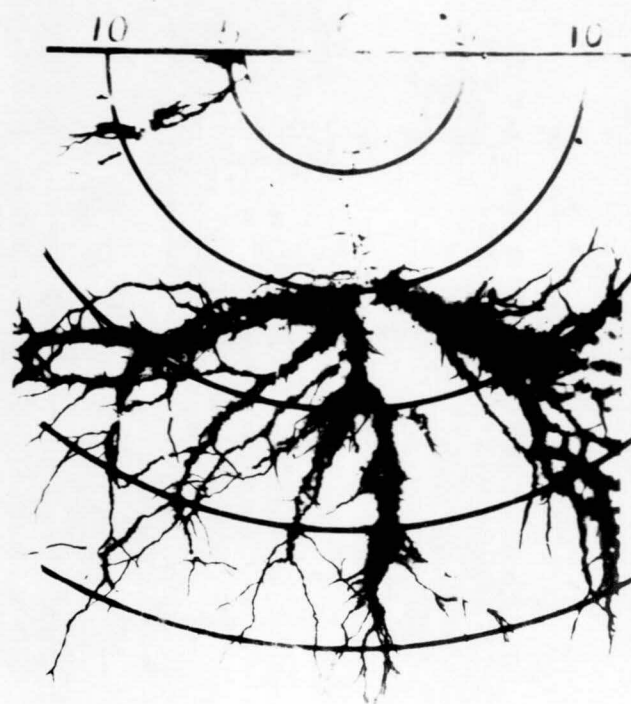


(c) 刺 10 cm 1 本

第7-4図 無刺及び有刺円壩状電極より発生する土中ストリーマの比較
(続き)



(a) 刺なし



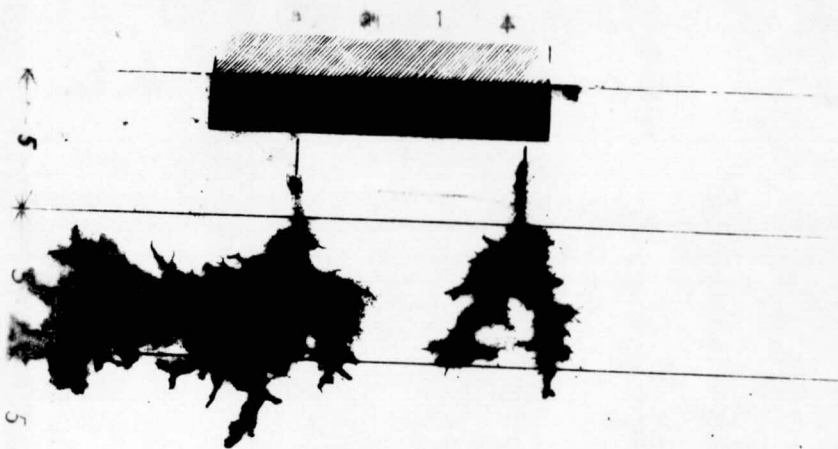
(b) 刺 10 cm 1 本

第7-5図 無刺及び有刺球状電極より発生する土中ストリーマの比較

$\rho = 30 \text{ K}\Omega\text{-cm}$

$V = 55 \text{ KV}$

$D = 8 \text{ cm}$



(b) 刺 2 本



(c) 刺 4 本

第7-6図 刺の本数と土中ストリーマ
 $\rho = 30 \text{ K}\Omega\text{-cm}$ $V = 30 \text{ KV}$
 $\ell = 4 \text{ cm}$ $D = 4 \text{ cm}$

極の直下に長さ $0 \sim 12 \text{ cm}$ の各種の長さの刺 1 本をつけたものを中心電極とし、これに $25 \sim 100 \text{ ㏈V}$ の標準波形の衝電圧を印加し、その際の電圧波高値を電流波高値で除した、いわゆる見かけ上の抵抗値を測定した。

尚、土の比抵抗 P 及び土の容器の半径 R については、その都度附記する。

2. 中心電極が一定で刺の長さを变化した場合

中心電極の直径 $2R$ が 8 cm 、土の比抵抗 P が 4.7 及び $10.5 \text{ ㏈}\Omega\text{-cm}$ の場合の測定結果はオク-1, 2 表及び第 7-7, 8 図の如くであつて、これより、

- (1) 刺の効果による接地抵抗の低減は電圧が上昇すると減少する。
- (2) 逆に電圧が下降すれば、抵抗低減は増大するが電圧が充分低い所では効果は消滅する。
- (3) 刺の長さが増加すれば、刺の効果は大きく、電圧が高いところでその効果は消えない。

この接地抵抗を中心電極の半径 R を以て示せば、第 7-9, 10 図の如くなる。

第 7-7 表 有刺球状電極の接地抵抗(Ω) $D=8 \text{ cm}$, $P=46.6 \text{ ㏈}\Omega\text{-cm}$

刺の長さ (cm) 印加電圧 ㏈V	0	2	4	8	12
25	1770	1550	1420	1105	885
31	1380	1260	1170	925	740
37	1060	960	820	760	625
44	826	774	723	608	592
50	582	571	510	472	328
62	410	410	410	368	362
72	347	347	359	331	286
75	258	276	246	*	*

* ストリ-マが外部電極(容器)に到達した為低減効果の測定が不可能となった。

第7-2表 有利球状電極の接地抵抗(Ω) $D=8cm$ $\rho=10.5 \Omega\text{-cm}$

刺の長さ (cm) 印加電圧 V	0	2	4	8	12
35	275	254	247	242	232
40	263	245	234	232	222
45	252	234	227	222	214
55	221	208	203	200	193
65	196	187	183	180	175
75	178	185	165	163	160
85	161	155	151	149	146
90	154	148	146	145	141

但し 式(7-14)より

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_c} + R \frac{2\pi}{\rho} \quad (7-2a)$$

もし、外部電極半径 R_c が無限大となれば

$$R_t = \frac{\rho}{2\pi} \frac{1}{R} \quad (7-2b)$$

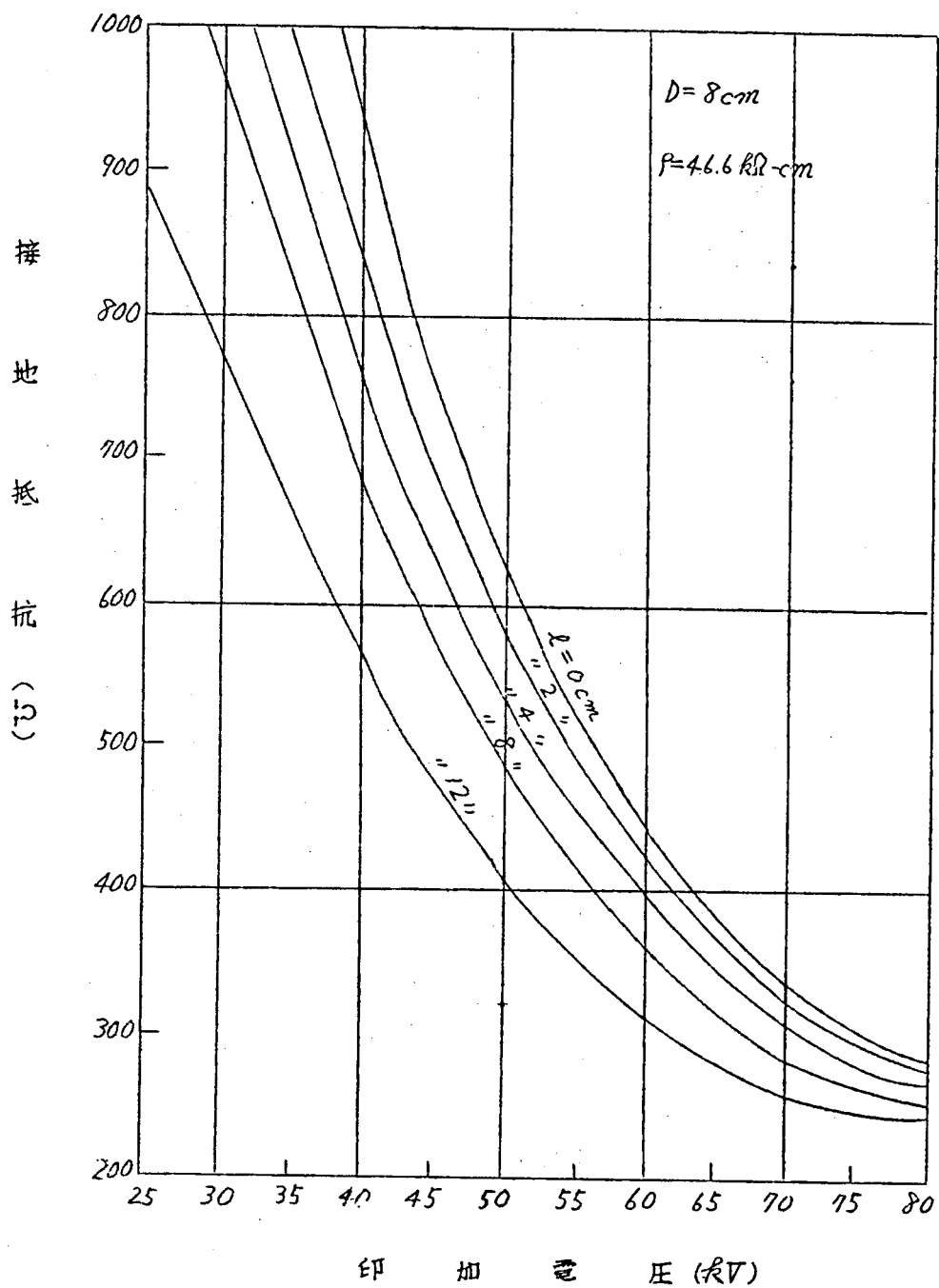
となり、等価半径 R_t は接地抵抗の逆数(接地コンダクタンス)に比例し、実際の接地に於ては、この関係が成立する。本実験に於ける模擬接地に於いても、式(7-2a)の右辺の第2項は第1項に比し、小さいから、近似的に式(7-2b)が成立する。(第1章第5節参照)

従って式(7-2b)より R_t に対応する $1/R$ を図上に併記した。図より明らかな如く、刺の長さ l がパラメータとして変化すれば、それに応じて等価半径 R_t 又は接地抵抗の逆数が一定値だけ増加する。

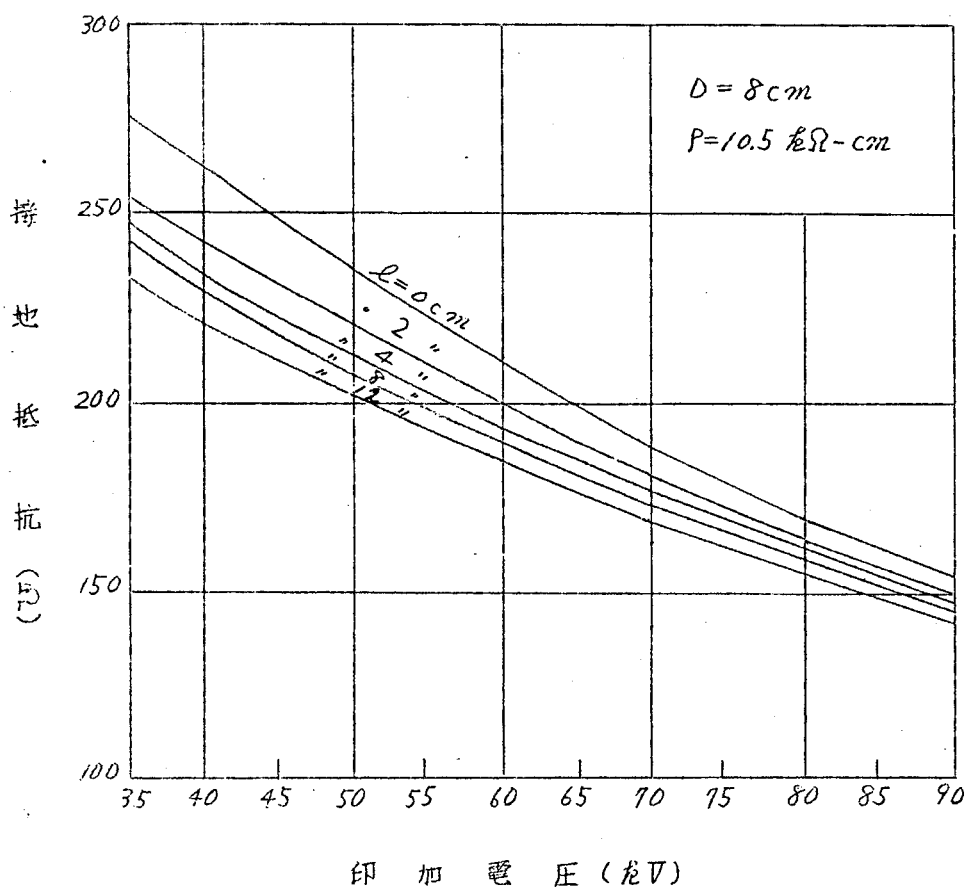
これより、 l を横軸にとり、印加電圧をパラメータとして記せば l 対 R_t の関係は第7-11、12図に示す如く、簡単な直線関係となる。

従って

$$R_t = R_{t0} + k_1 l \quad (7-3a)$$



第 7-7 図 有刺球状電極の接地抵抗



第7-8図 有利球状電極の接地抵抗

但し r_{i0} ; 無刺球状電極の等価半径

k_1 ; 条件により定まる定数

l ; 刺の長さ

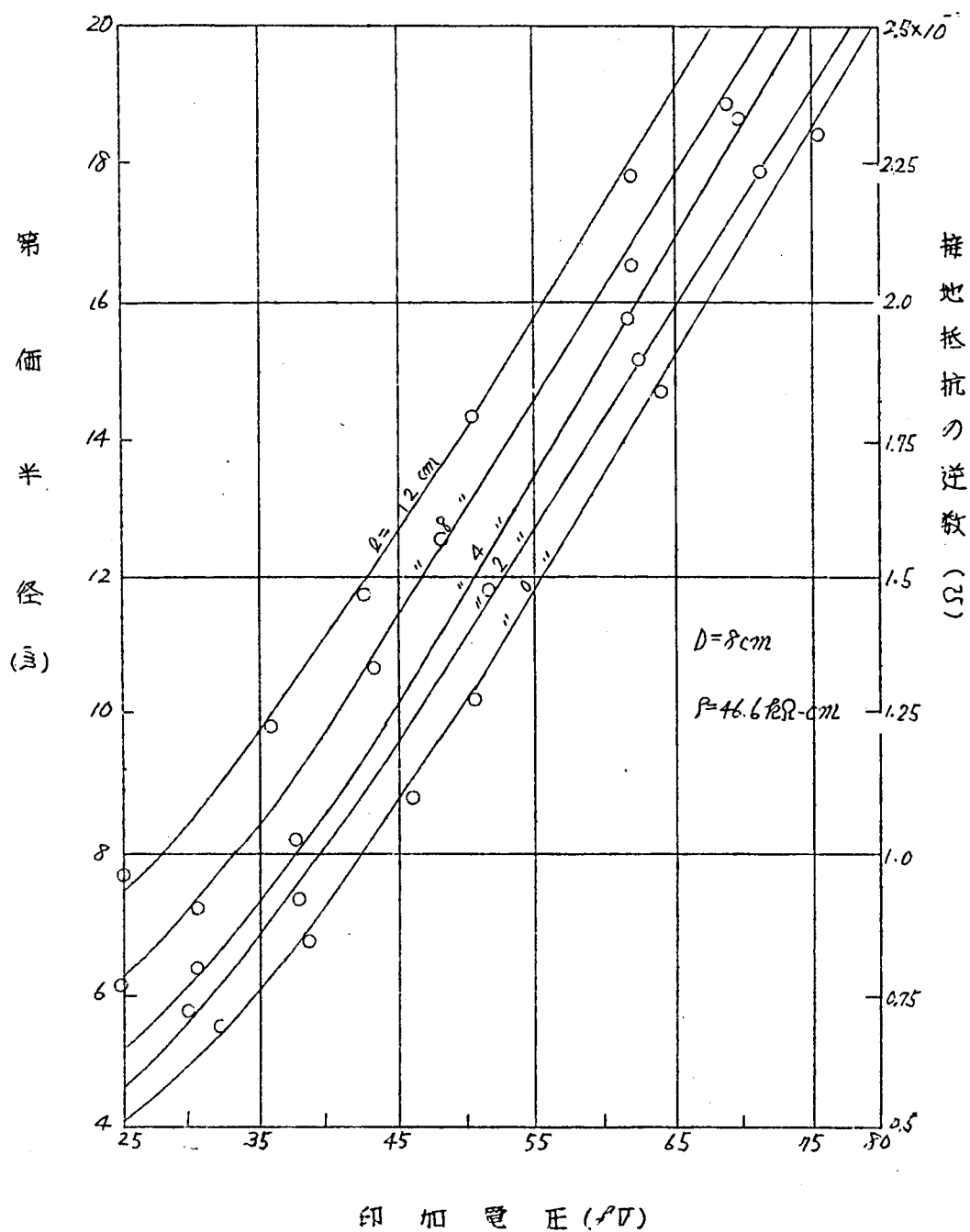
上式に、式(7-26)を適用すれば

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{i0}} + k_2 \cdot l$$

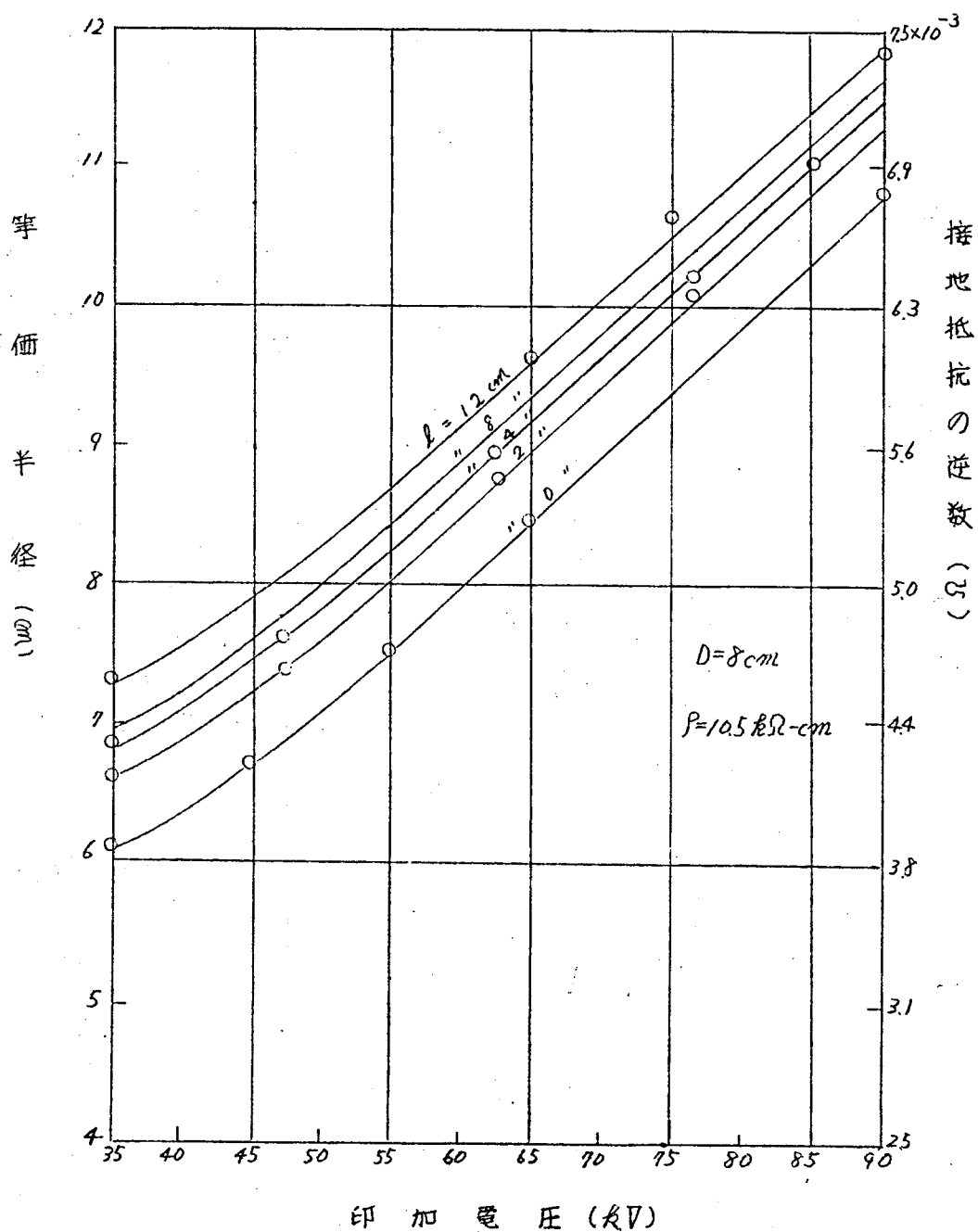
但し R_{i0} ; 無刺球状電極の等価半径

k_2 ; 条件により定まる定数

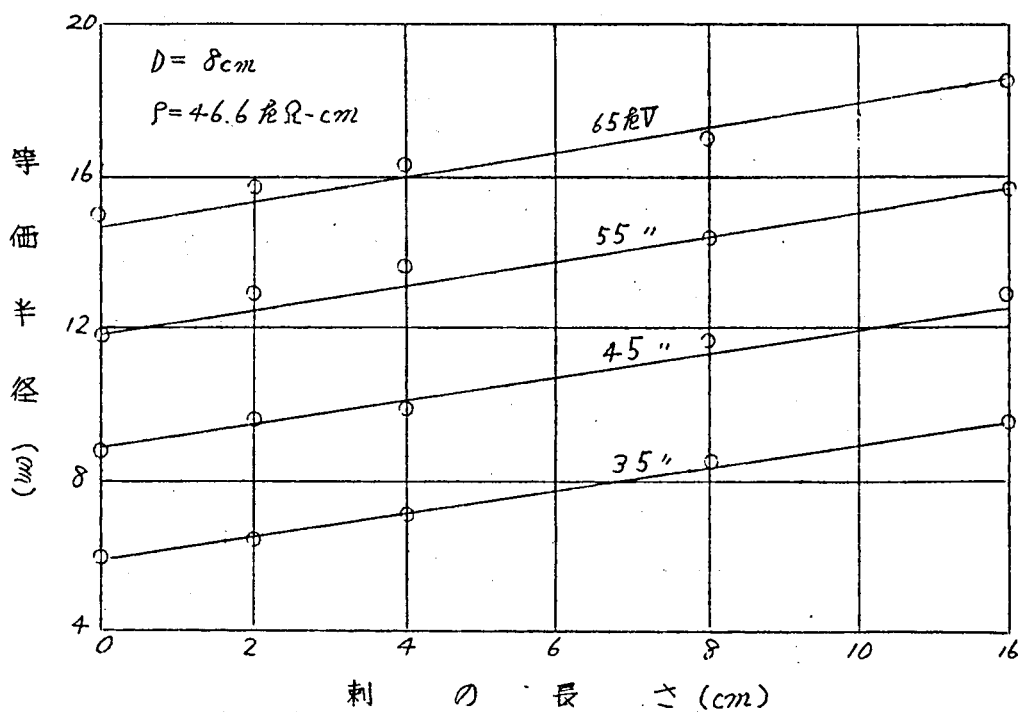
また、第7-11、12図を半対数グラフ上に記せば第7-13、14図の如く



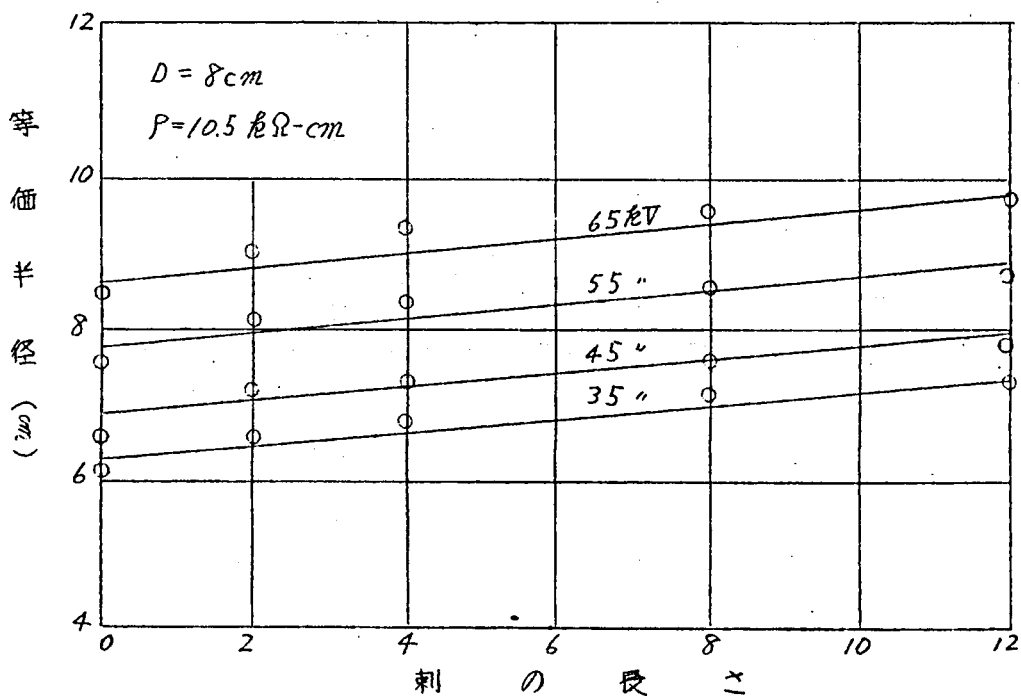
第7-9図 有刺球状電極の等価半径 (其の一)



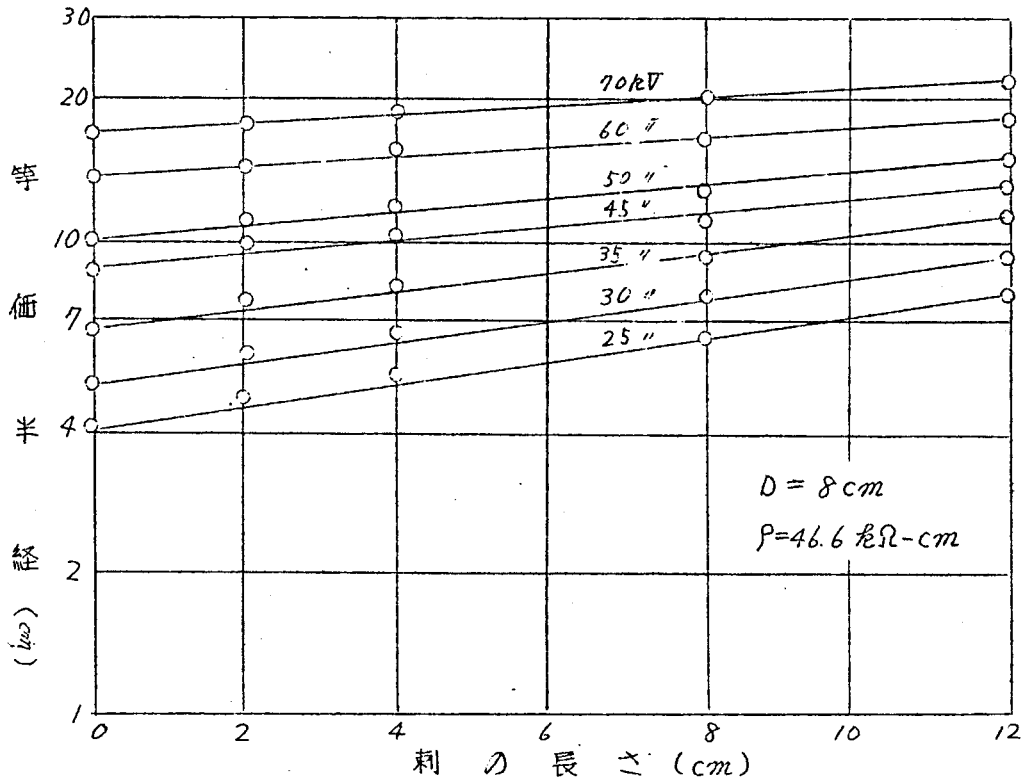
第7-10図 有刺球状電極の等価半径 (其の二)



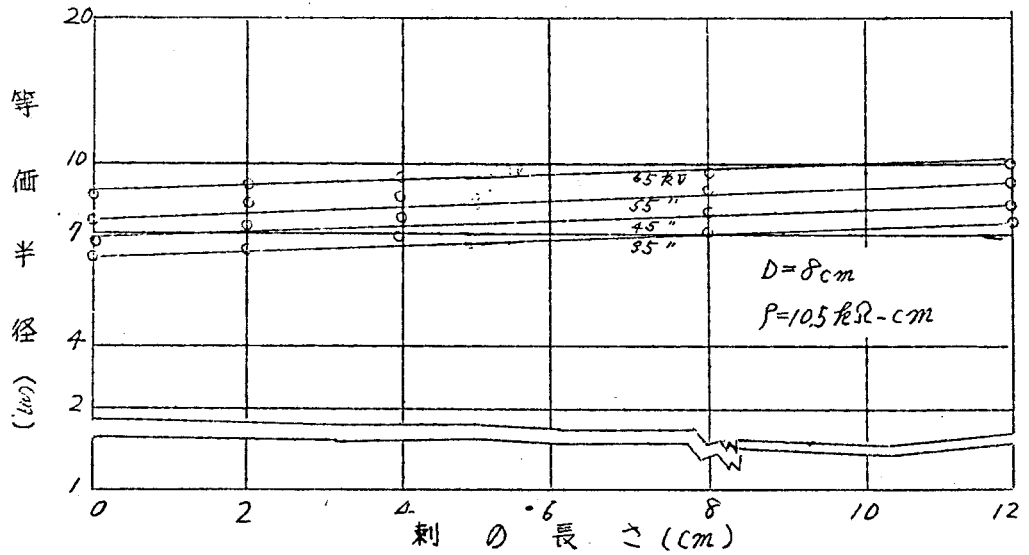
第7-11図 有刺球状電極の等価半径 (其の三)



第7-12図 有刺球状電極の等価半径 (其の四)



第7-13図 有刺球状電極の等価半径



第7-14図 有刺球状電極の等価半径

たり、同様に直線関係を得る。故に

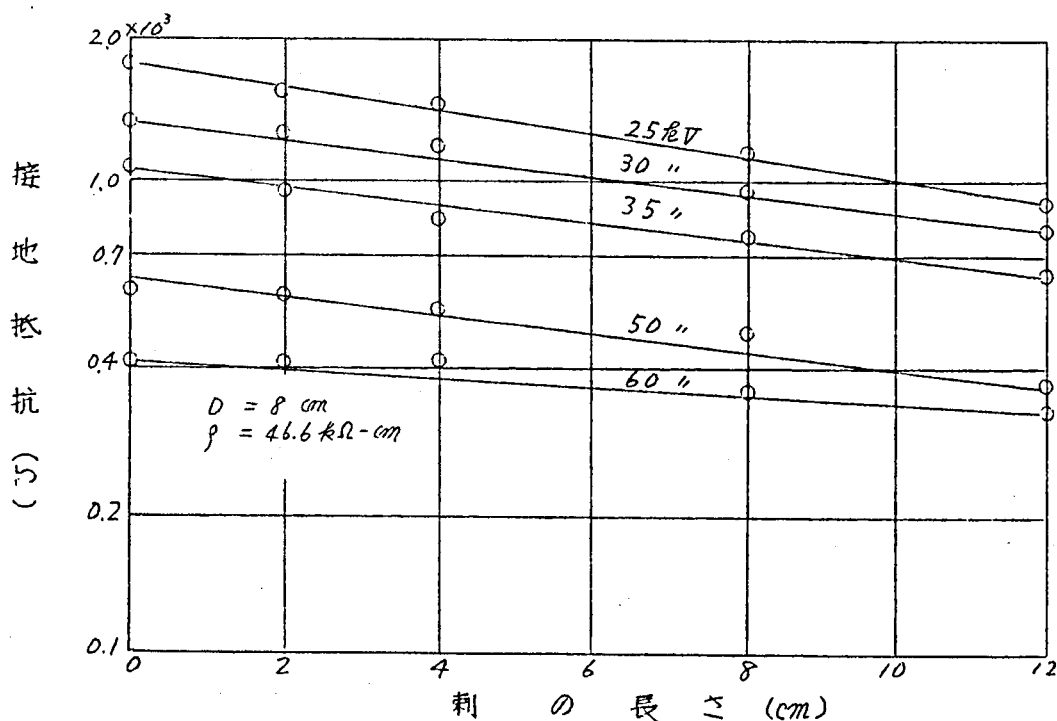
$$\log_{10} R_s = \log_{10} R_{i0} + k_3 l \quad (7-4a)$$

但し、 k_3 ：条件により定まる定数

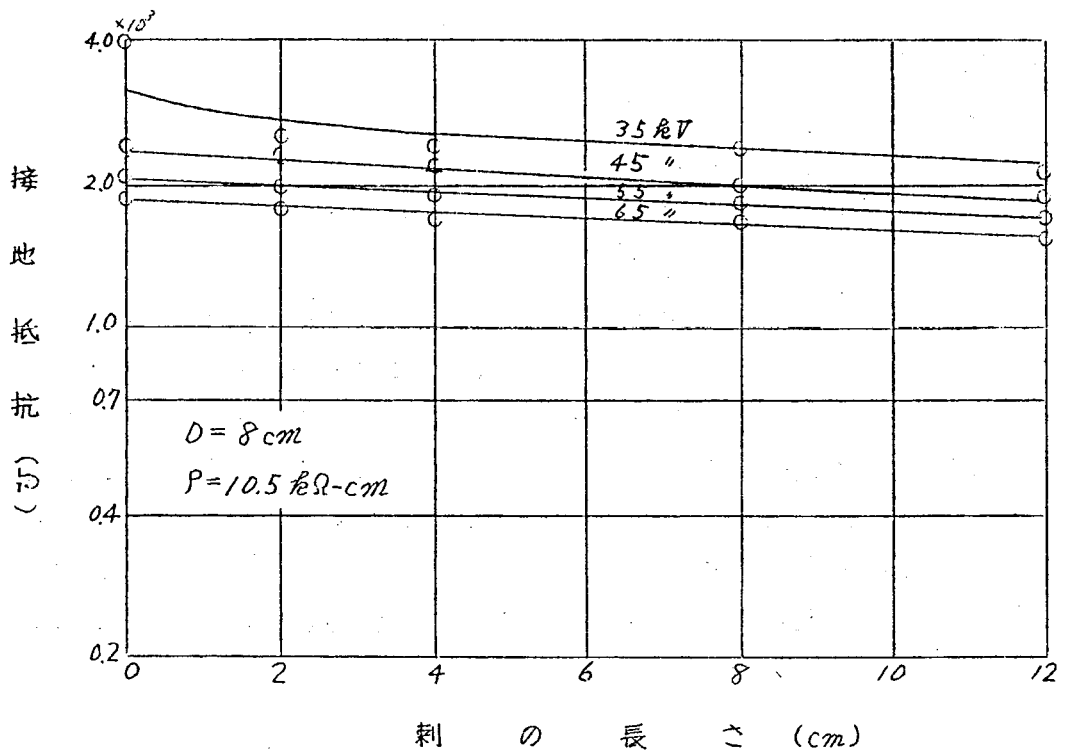
前回と同様にして、上式に式(7-2b)を適用すれば

$$\log R = \log R_{i0} - k_4 l \quad (7-4b)$$

かくの如く、刺の効果に関しては種々の表現方法があるが、後記の如く式(7-3b)による記述が簡単で且つ広い範囲の電圧に対し適用できるから、主として、この式を使用することとする。また式(7-4b)は半対数グラフに直接抵抗値 R を記入することが出来るから接地抵抗の逆数及びその等価半径の算出等の手向が省けて便利である。一例として、第79、7-10図のデータを式(7-4b)により表現すれば、第7-15、16図の如くであり、印加電圧の低い場合は、多少上に凹の曲線になる傾向がある。



第7-15図 有刺球状電極の接地抵抗



第7-16図 有刺球状電極の接地抵抗

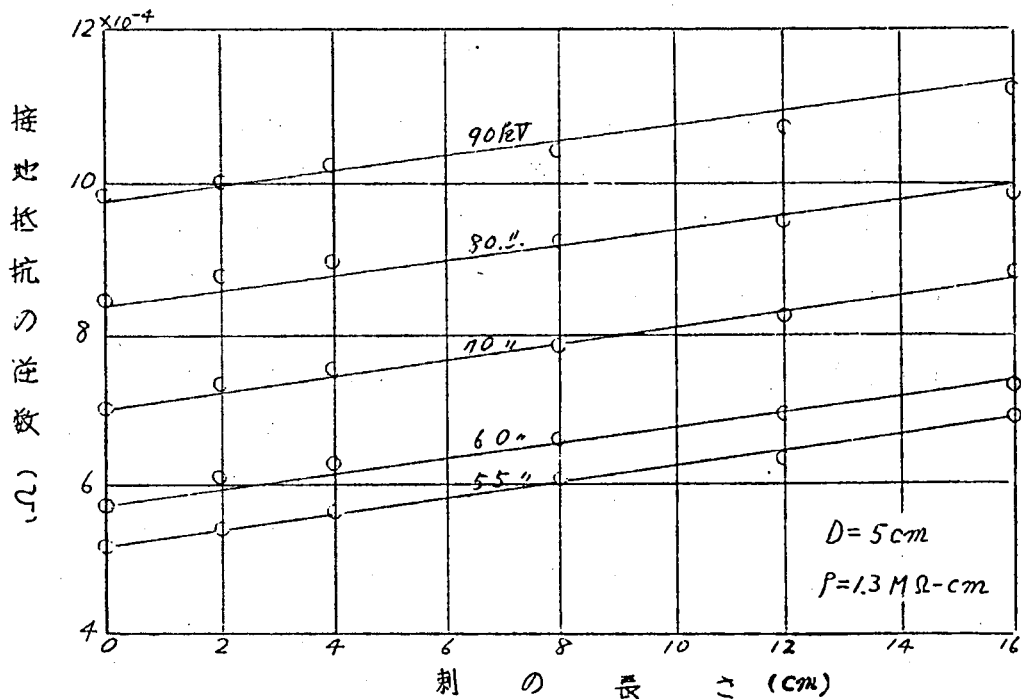
式(7-3a)及び(7-4a)において、無刺球状電極の街裏電圧に対する接地抵抗及びその等価半径 r_{io} は既に諸氏により研究が行われており、印加電圧、電極の大きさ、形状及び土の比抵抗率の函数である。または刺の長さで既知であるから、要するに V_1 (或は V_2) を印加電圧、電極の大きさ等のパラメータにつき表現すれば良いこととなる。

b. 高低抗土壌（赤土）における接地抵抗

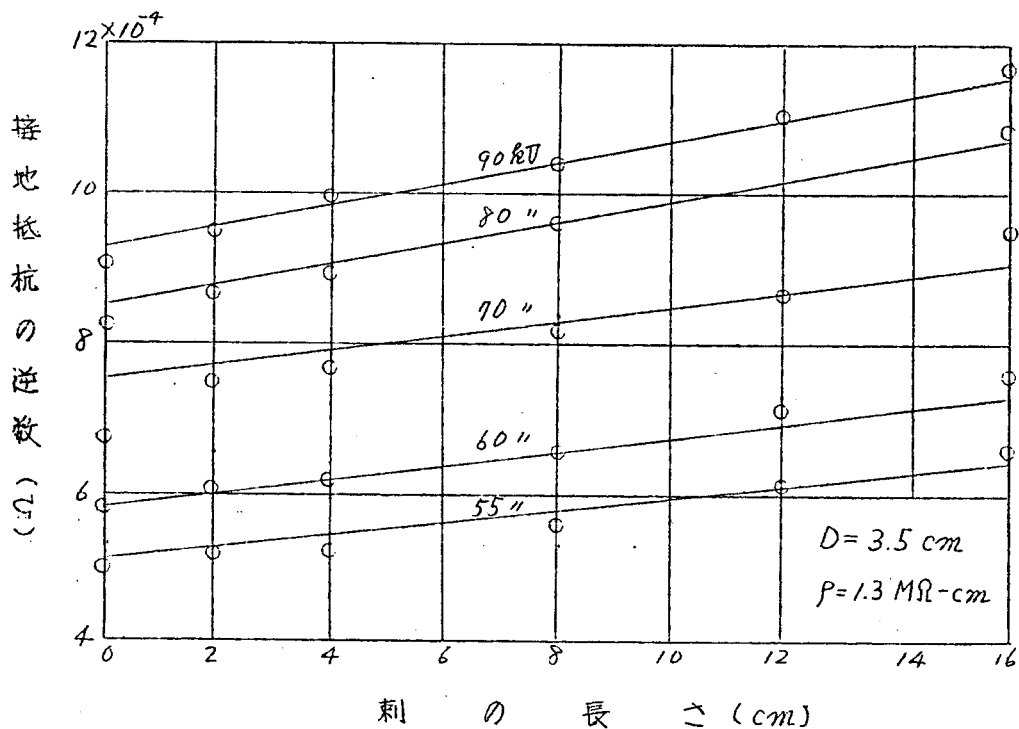
前項の実験は比較的比抵抗の低い ($\rho \approx 15 \text{ } \Omega\text{-cm}$) 土に於けるものであったが、有刺電極は高低抗の土壌においては特に有用であるから資料として赤土を使用し ($\rho \approx 1.3 \text{ M}\Omega\text{-cm}$) また長大な土中ストリーマの発生に対し、直径 300 cm の半球状の土の容器を用意した。中心電極及び刺の長さは前項に準ずる。但し印加電圧波高値は 50~150 kV である。その実

第7-3表 赤土における有刺球状電極の接地抵抗(Ω) $\rho=1.3 M\Omega\text{-cm}$

球の直径 $D(\text{cm})$	刺の長さ $l(\text{cm})$	印 加 電 圧 (伏 V)						
		55	60	70	80	90	95	100
5	0	19.20	17.50	14.30	11.90	10.20	9.85	—
	2	18.40	16.40	13.70	11.40	10.00	9.40	—
	4	17.70	16.00	13.30	11.20	9.80	9.30	—
	8	16.60	15.10	12.70	10.80	9.60	9.15	—
	12	15.80	14.50	12.20	10.50	9.30	9.00	—
	16	14.50	13.30	11.30	10.00	8.90	8.80	—
3.5	0	19.75	17.10	13.80	12.20	11.10	10.70	10.30
	2	19.00	16.50	13.30	11.50	10.50	10.20	9.90
	4	18.50	16.10	12.90	11.10	10.00	9.80	9.60
	8	17.75	15.20	12.10	10.40	9.50	9.20	9.10
	12	16.25	14.00	11.50	9.90	9.00	8.60	8.60
	16	15.50	13.30	10.50	9.25	8.50	8.30	8.40



第7-17図 有刺球状電極の接地抵抗

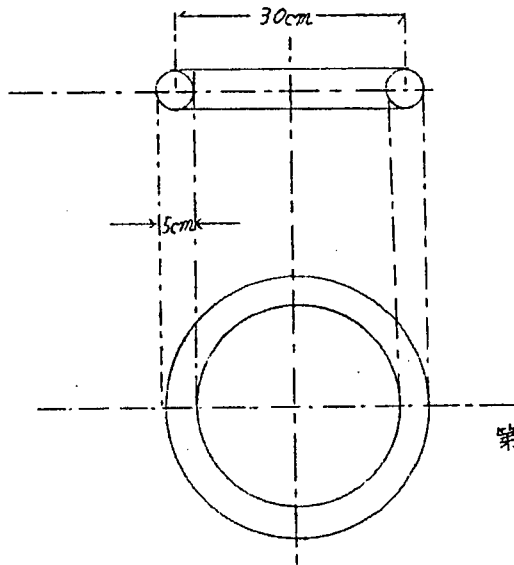


第7-18図 有刺球状電極の接地抵抗

実験結果を示せば、第7-3表の如くであつて、接地抵抗の逆数を計算し、式(7-3b)により表示すれば第7-17、18図の如くである。これより明らかな如く、比抵抗の高低に拘らず実験式(7-3a, b)が成立する。

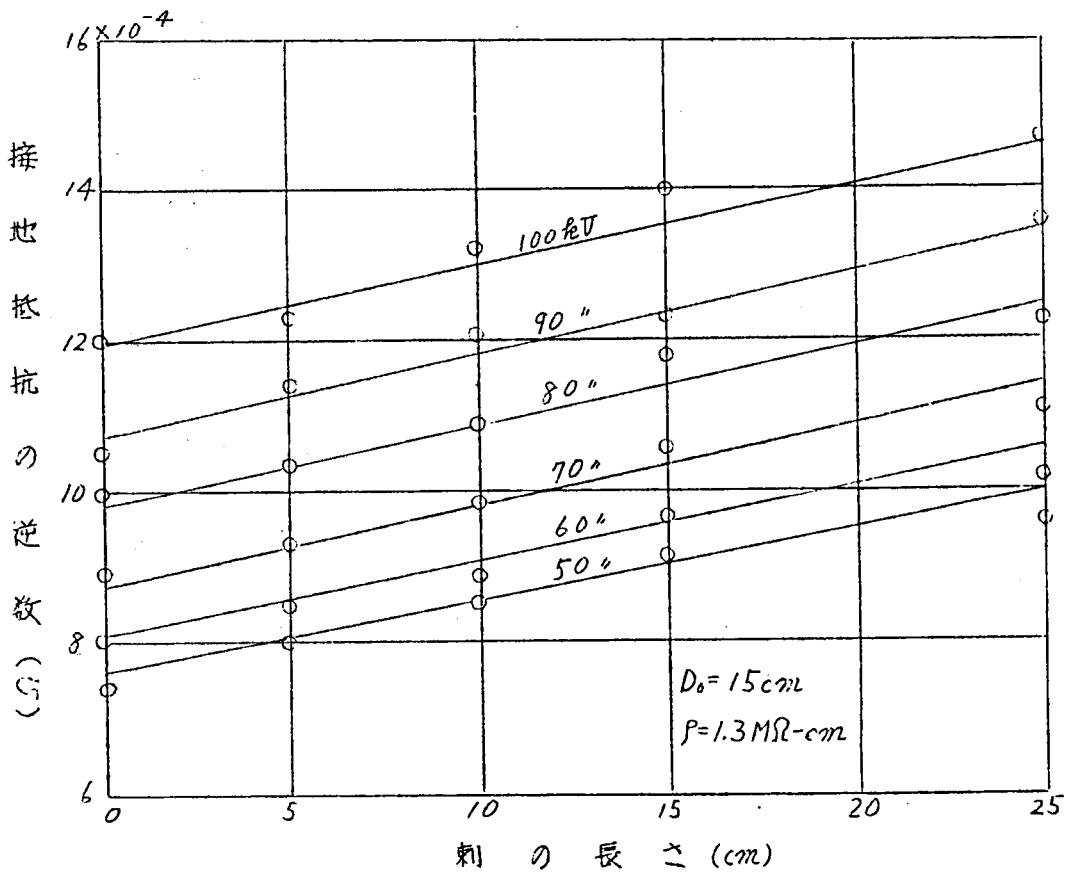
C 環状電極に於ける接地抵抗

上記の中心電極はすべて球状であつたのに対し、第7-19図に示す如き接地電極を用い、これに対称の位置に等長の刺を2本附し、その接地抵抗を測定した結果は第7-4表、第7-20図の如くであり、前項と同様、式(7-3)が成立する。これにより推定すれば、接地電極の形状は球状、環状のみならず、任意の形の接地電極に対し、同様の関係が成立するものと考へられる。



第7-19図

環状電極の一例



第7-20図 有刺環状電極の接地抵抗

第7-4表 赤土における有刺環状電極の接地抵抗(Ω) $\rho=1.3M\Omega\text{-cm}$, $D_0=15\text{cm}$

刺の長さ l (cm)	印 加 電 圧 (kv)					
	55	60	70	80	90	100
0	13.60	12.50	11.20	10.00	9.50	8.30
5	12.50	11.70	10.74	9.70	8.80	8.12
10	11.70	11.20	10.15	9.20	8.30	7.55
15	10.90	10.35	9.40	8.47	7.70	7.17
25	10.34	9.78	8.98	8.12	7.38	6.83

d. 球状接地電極の直径及び土の比抵抗を变化する場合

式(7-36)の ρ_2 は中心電極の直径 D 及び土の比抵抗 ρ の函数であるから、その特性を知るため、 D 及び ρ を变化して接地抵抗を測定し第7-5～8表に示す。この抵抗値の対数をとリ、式(7-36)により表示すれば、第7-21～24図の如くである。尚 $\rho=1.3, M\Omega\text{-cm}$ に於ける $D=5, 3.5\text{cm}$ の場合は第(7-3)表を採用する。このとき式(7-36) ρ_2 の变化を球の直径に対して示せば第7-9表の如くである。

これより明らかになリ、 ρ_2 は球の直径と共に増加して最大値をとリ、その後減少する。

e. 環状電極の直径を变化する場合

前項(d)の球状電極と同様の手法を以て第7-25図に示す如き6種の環状電極につき、 $\rho=54.7\Omega\text{-cm}$ の場合、刺の効果を測定すれば、第7-10表、第7-26図の如くなる。これより ρ_2 を求めれば第7-11表を得る。

第 7-5 表 有刺球状電極の接地抵抗 (Ω) $\rho=61.7 \text{ } \Omega\text{-cm}$

球の直径 $D(\text{cm})$	刺の長さ $l(\text{cm})$	印 加 電 圧 (KV)				
		55	60	70	80	90
15.0	0	860	625	447	320	—
	2	835	585	425	310	—
	4	680	505	380	290	—
	8	600	465	360	280	—
	12	555	430	335	260	—
	16	520	400	310	240	—
10.5	0	880	617	470	360	275
	2	835	560	435	350	270
	4	700	500	495	320	265
	8	585	445	365	300	245
	12	535	400	330	280	240
	16	495	365	302	265	230
8.0	0	875	615	470	355	250
	2	810	575	450	340	250
	4	675	525	415	325	250
	8	610	475	380	305	245
	12	570	440	355	240	240
	16	500	400	330	275	235
3.5	0	980	662	470	345	282
	2	786	590	435	335	278
	4	700	550	415	325	270
	8	608	490	390	315	263
	12	560	450	360	292	250
	16	495	404	330	280	244

第 7-6 表 有刺球状電極の接地抵抗 (R) $\rho=160 \text{ } \Omega\text{-cm}$

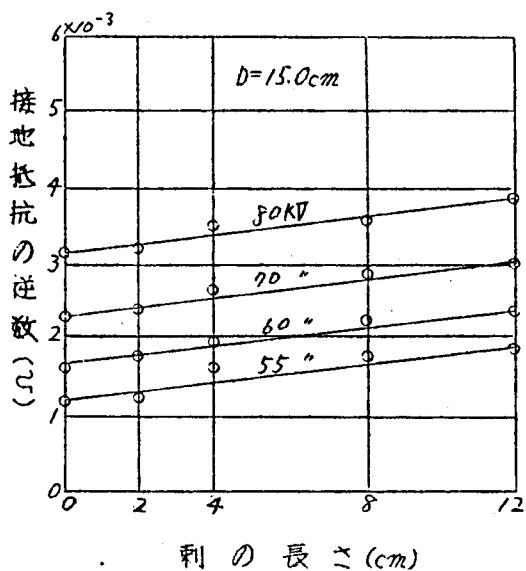
球の直径 $D \text{ (cm)}$	刺の長さ $\ell \text{ (cm)}$	印 加 電 圧 (V)					
		50	60	70	80	90	100
15	0	1220	990	765	560	380	280
	2	1010	800	580	430	310	250
	4	800	650	500	380	280	230
	8	660	520	420	330	260	230
	12	500	420	340	280	230	200
10	0	3540	2490	1640	1010	570	300
	2	2360	1700	1160	740	450	280
	4	1600	1160	820	550	380	260
	8	960	760	580	440	340	240
	12	600	500	400	320	260	210
8	0	3500	2520	2000	1050	660	340
	2	1660	1320	1000	700	420	300
	4	1260	1000	760	650	370	250
	8	920	760	600	460	330	220
	12	680	540	440	340	250	210
5	0	3200	1800	1190	920	540	320
	2	1510	1340	940	960	450	280
	4	1050	860	680	520	380	260
	8	880	660	540	420	330	240
	12	620	520	420	340	280	200
3.5	0	3400	2000	1240	840	500	300
	2	1800	1400	1020	710	430	280
	4	1340	1060	800	580	380	250
	8	950	760	600	440	340	240
	12	660	580	450	360	290	230

第 7-7 表 有利球状電極の接地抵抗 (Ω) $\rho = 2.72 \text{ } \Omega\text{-cm}$

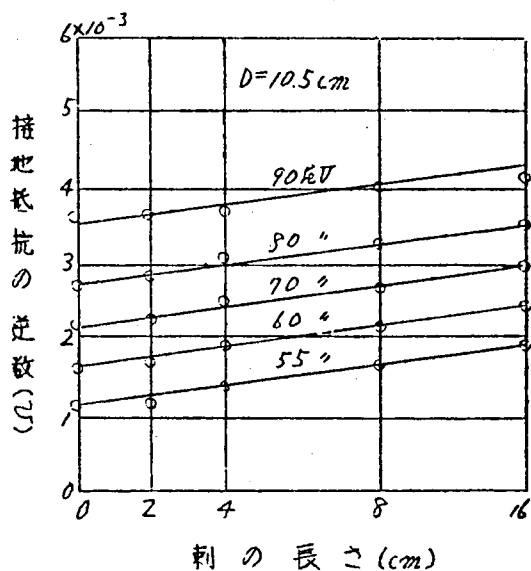
球の直径 D (cm)	刺の長さ l (cm)	印 加 電 圧 (V)				
		60	70	80	90	100
15	0	1800	1200	750	450	300
	2	1590	900	660	370	270
	4	1300	900	500	300	250
	8	1000	650	380	250	200
	12	880	500	300	200	170
10	0	2500	1400	850	480	530
	2	1750	1150	720	400	300
	4	1500	1100	580	330	270
	8	1150	720	420	250	270
	12	900	550	330	215	190
8	0	2750	1600	1000	550	350
	2	2220	1200	870	480	500
	4	2000	1400	700	360	300
	8	1300	800	500	320	250
	12	1000	650	350	230	200
5	0	3800	2000	1200	600	350
	2	3030	1500	980	500	310
	4	2700	1600	850	500	300
	8	1700	1000	600	380	250
	12	1100	650	400	250	200
3.5	0	5100	2600	1300	700	400
	2	4500	2400	1200	550	330
	4	3400	2000	1000	500	350
	8	2000	1200	700	440	260
	12	1200	650	400	270	210

第 7-8 表 有利球状電極の接地抵抗 ($k\Omega$) $\rho=1.3M\Omega\text{-cm}$

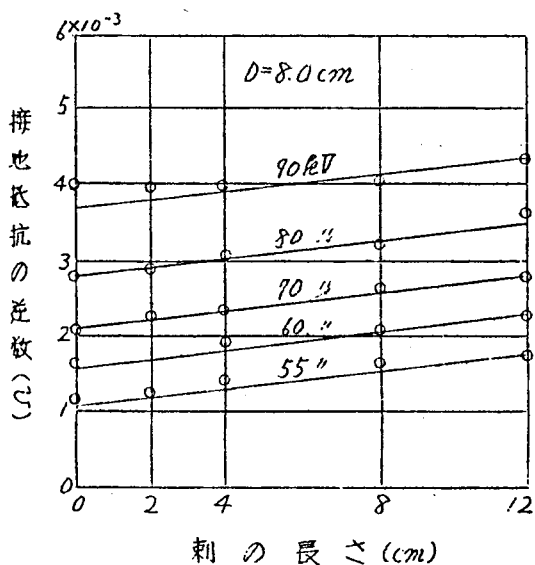
球の直径 D (cm)	利の長さ l (cm)	印 加 電 圧 (kV)					
		55	60	70	80	90	100
15	0	14.80	13.80	12.10	10.70	9.70	9.30
	2	14.30	13.30	11.70	10.30	9.30	9.00
	4	14.00	13.00	11.25	10.00	9.10	8.80
	8	13.70	12.75	11.00	9.70	8.70	8.30
	12	13.25	12.30	10.70	9.30	8.40	8.00
	16	12.50	11.50	10.00	8.75	7.90	7.70
10.5	0	17.50	15.90	13.00	11.00	9.75	9.40
	2	16.40	14.70	12.20	10.50	9.40	9.10
	4	15.60	14.00	11.60	10.10	9.20	8.90
	8	14.80	13.50	11.30	9.80	8.80	8.60
	12	13.80	12.70	10.75	9.40	8.40	8.10
	16	13.00	11.90	10.00	8.70	7.90	7.70
8.0	0	18.80	17.30	14.60	12.20	10.40	9.70
	2	17.90	16.30	13.50	11.30	9.90	9.40
	4	16.90	15.30	12.75	10.80	9.50	8.90
	8	15.90	14.40	12.00	10.20	8.90	8.50
	12	14.80	13.40	11.20	9.60	8.50	8.20
	16	13.80	12.60	10.50	9.10	8.10	7.80



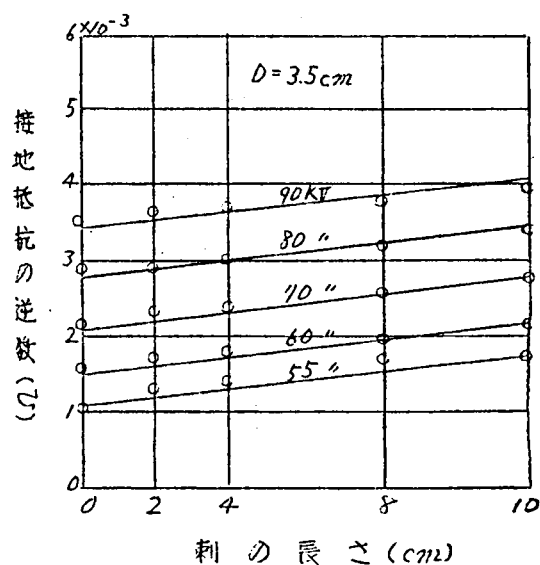
(a)



(b)

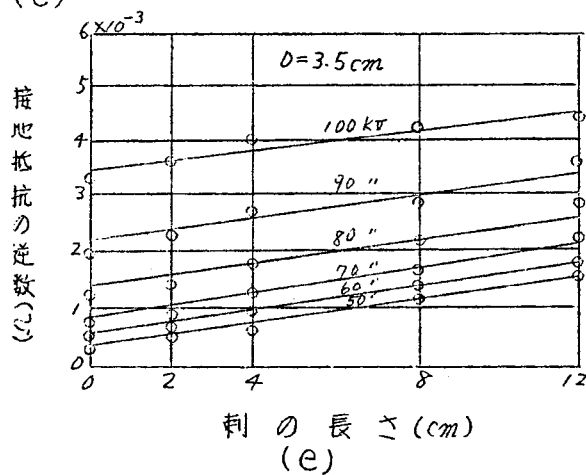
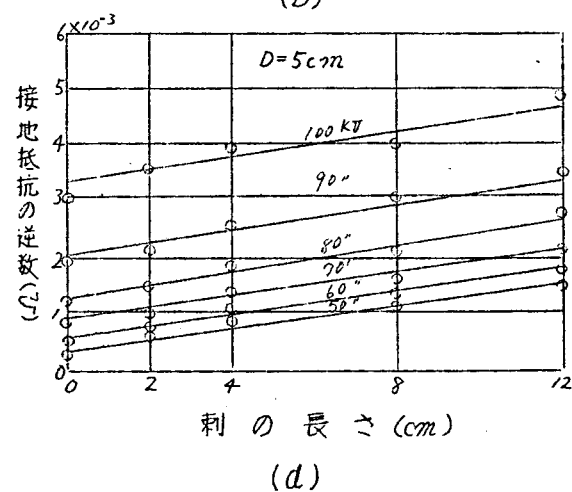
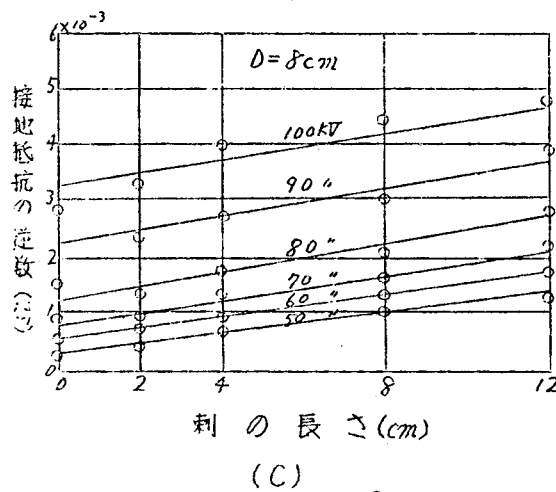
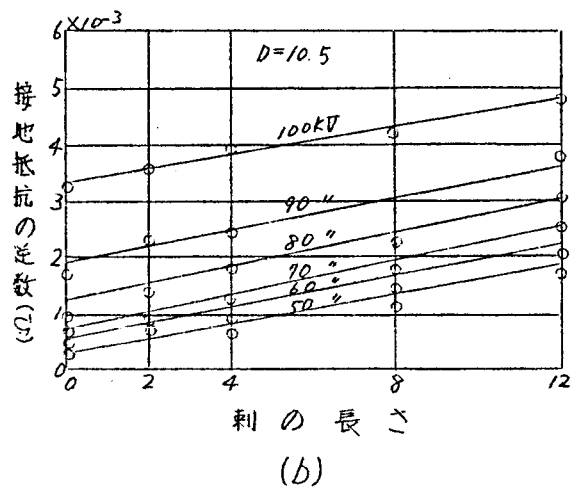
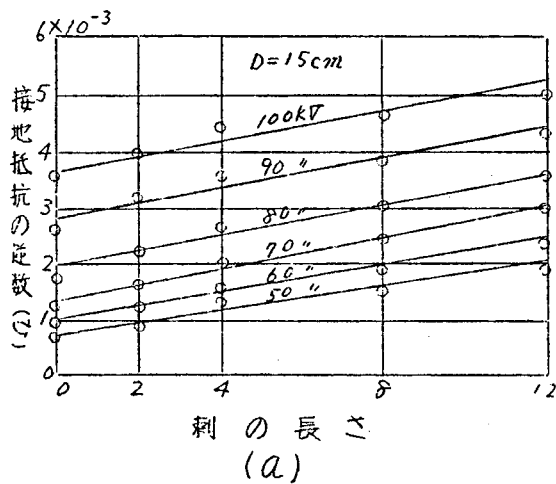


(c)

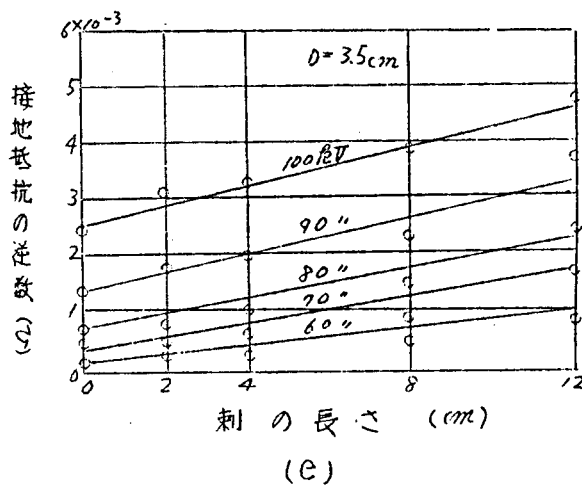
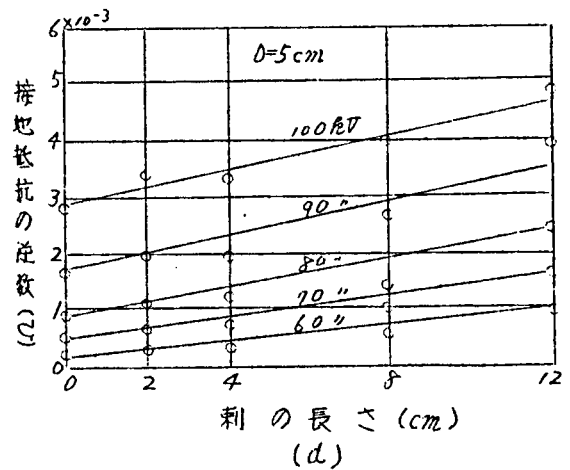
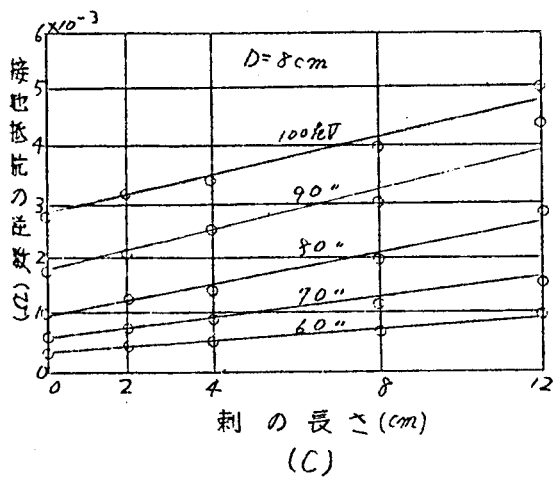
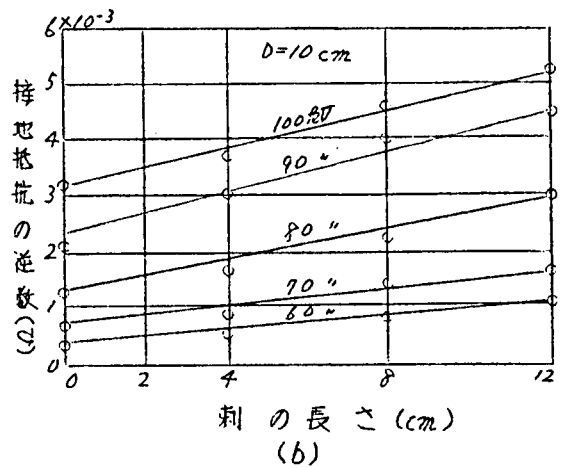
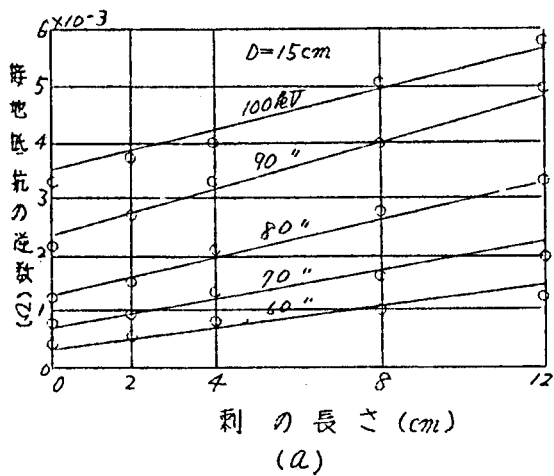


(d)

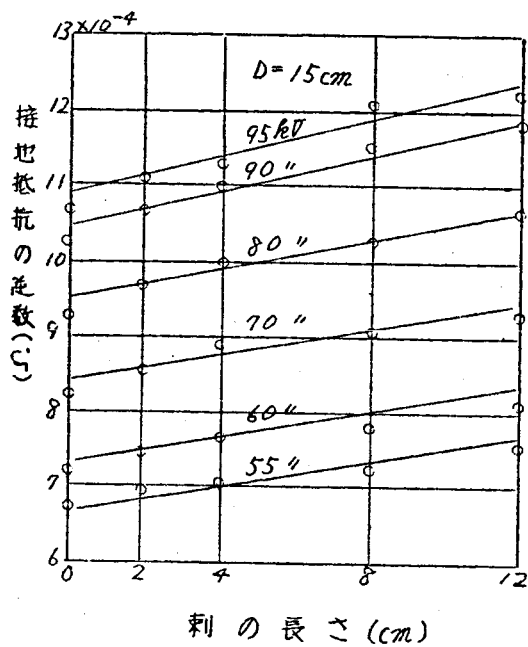
第7-21図 有刺球状電極の接地抵抗 ($\rho=61.7\ \Omega\text{-cm}$)



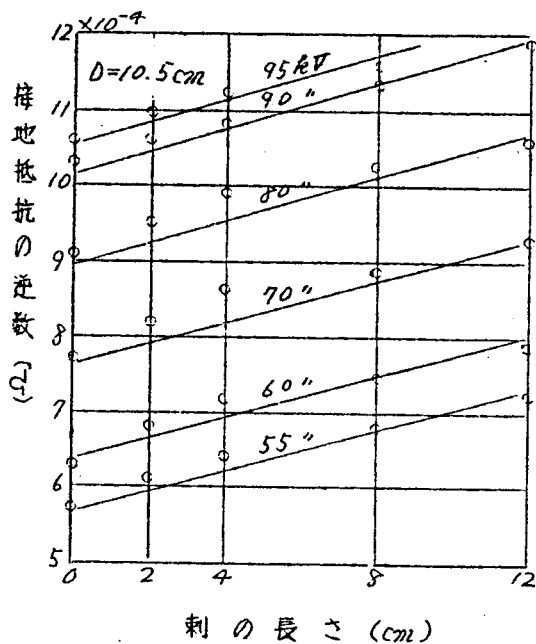
第7-22図 有刺球状電極の接地抵抗 ($P=160\Omega\text{-cm}$)



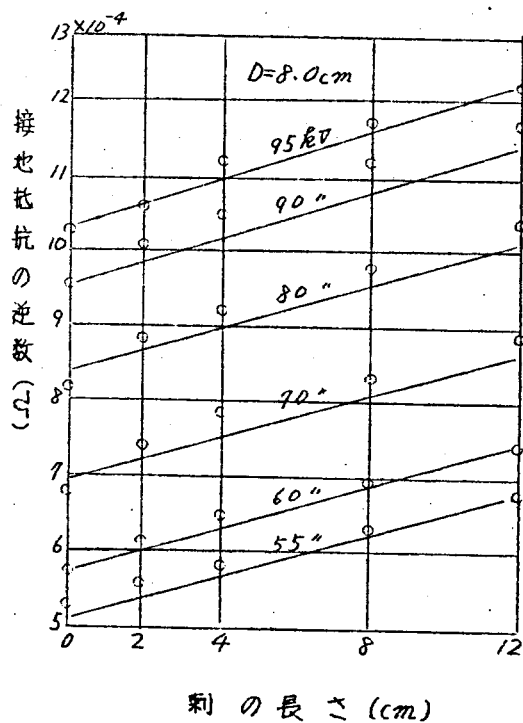
第7-23 図 有刺球状電極の接地抵抗 ($\rho=272 \cdot k\Omega \cdot \text{cm}$)



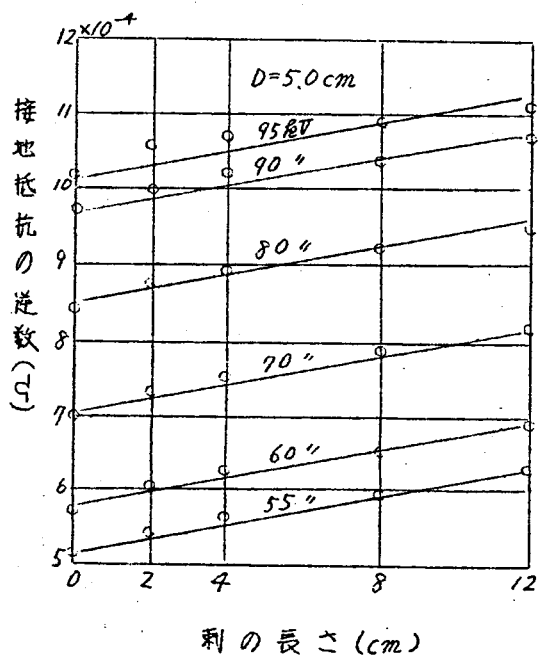
(a)



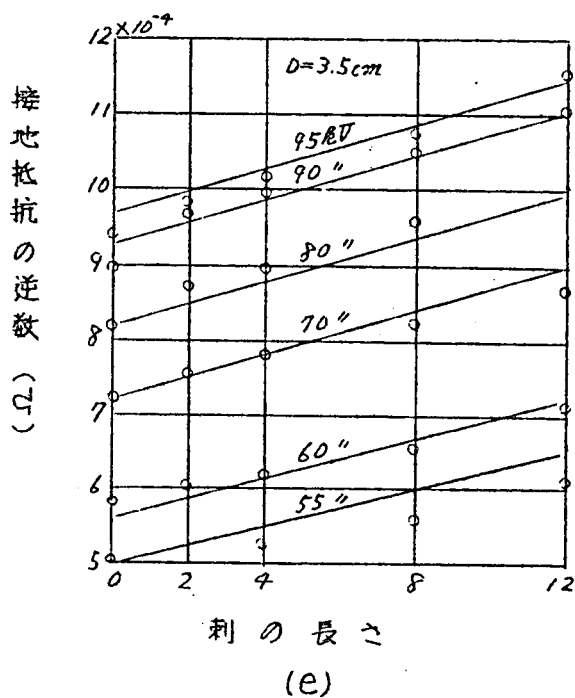
(b)



(c)



(d)



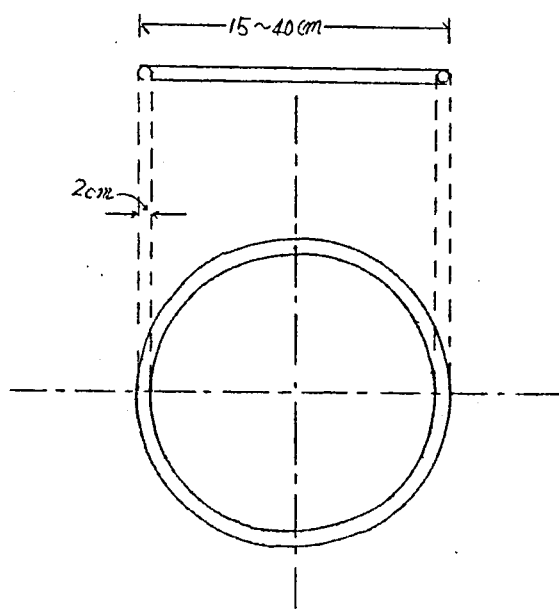
第7-24 図 有刺球状電極の接地抵抗
($P = 1.3 \text{ M}\Omega\text{-cm}$)

第7-9表 k_2 の測定値 (mv/cm) (球状電極)

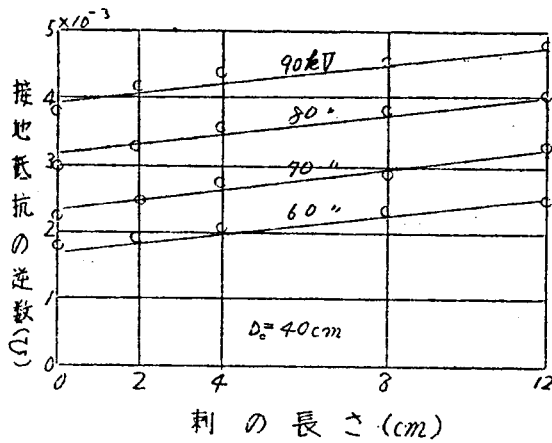
球の直径 $D(\text{cm})$		3.5	5.0	8.0	10.0	15.0
k_2	$P = 1.7 \text{ k}\Omega\text{-cm}$	0.58	—	0.68	0.68	0.68
	160 "	0.53	0.75	0.70	0.65	0.58
	270 "	0.65	1.05	0.97	0.84	0.80
	1300 "	0.83	0.92	1.06	1.17	0.83

第 7-10 表 有利環状電極の接地抵抗 (Ω) $\rho=54.7 \Omega\text{-cm}$

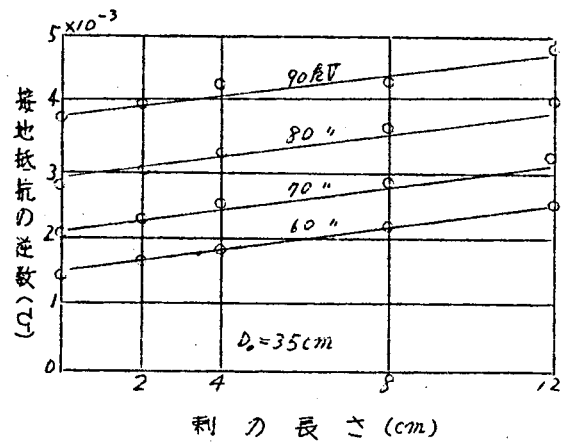
環の直径 D (cm)	刺の長さ l (cm)	印 加 電 圧 (kV)			
		60	70	80	90
40	0	590	440	330	260
	2	530	400	300	245
	4	490	370	280	230
	8	440	340	270	220
	12	410	310	250	210
35	0	650	480	350	260
	2	590	440	330	250
	4	540	410	300	240
	8	480	360	280	230
	12	410	320	250	210
30	0	780	550	390	260
	2	690	490	350	250
	4	630	450	330	240
	8	520	390	300	230
	12	430	340	270	220
25	0	900	630	420	260
	2	810	520	380	250
	4	750	530	360	240
	8	570	410	300	230
	12	470	360	270	220
20	0	1080	710	460	290
	2	960	660	420	270
	4	830	580	380	250
	8	600	440	320	230
	12	490	370	280	220
15	0	1540	910	560	340
	2	1230	810	520	320
	4	1020	680	460	300
	8	730	520	360	270
	12	520	400	300	250



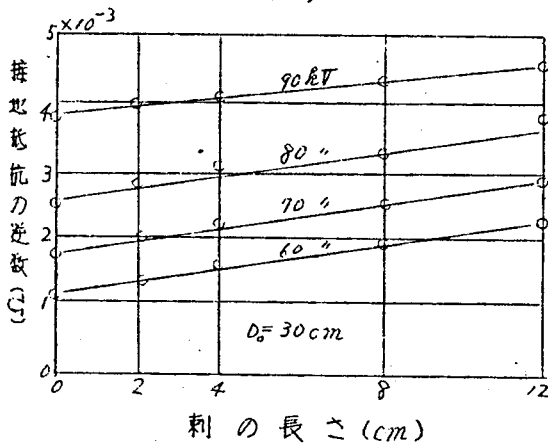
第7-25圖 環狀電極 6 種



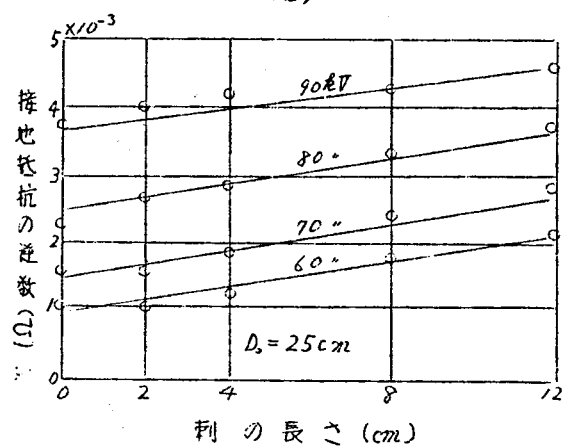
刺の長さ (cm)
(a)



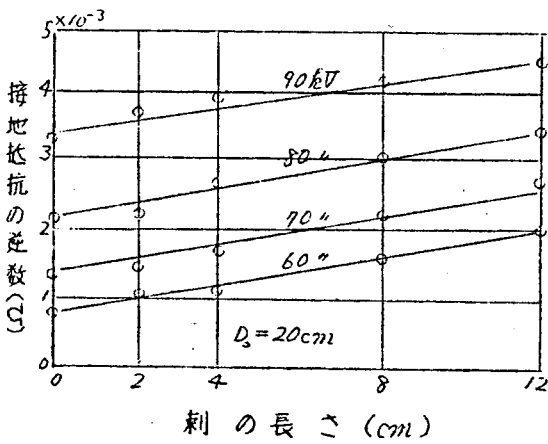
刺の長さ (cm)
(b)



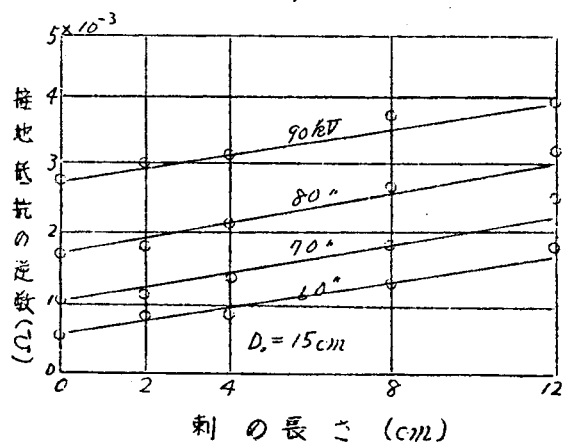
刺の長さ (cm)
(c)



刺の長さ (cm)
(d)



刺の長さ (cm)
(e)



刺の長さ (cm)
(f)

第 7-26 図 環状電極の接地抵抗 ($\rho = 54.7 \text{ } \Omega\text{-cm}$)

第 7-11 表 ℓ_2 の測定値 (m/cm) (環状電極)

環の直径(cm)	15	20	25	30	35
ℓ_2	0.53	0.47	0.42	0.37	0.35
$1/g_0 (\ell_2 \Omega)$	1.13	0.92	0.78	0.68	0.60

§4 電圧電流波形と刺の効果

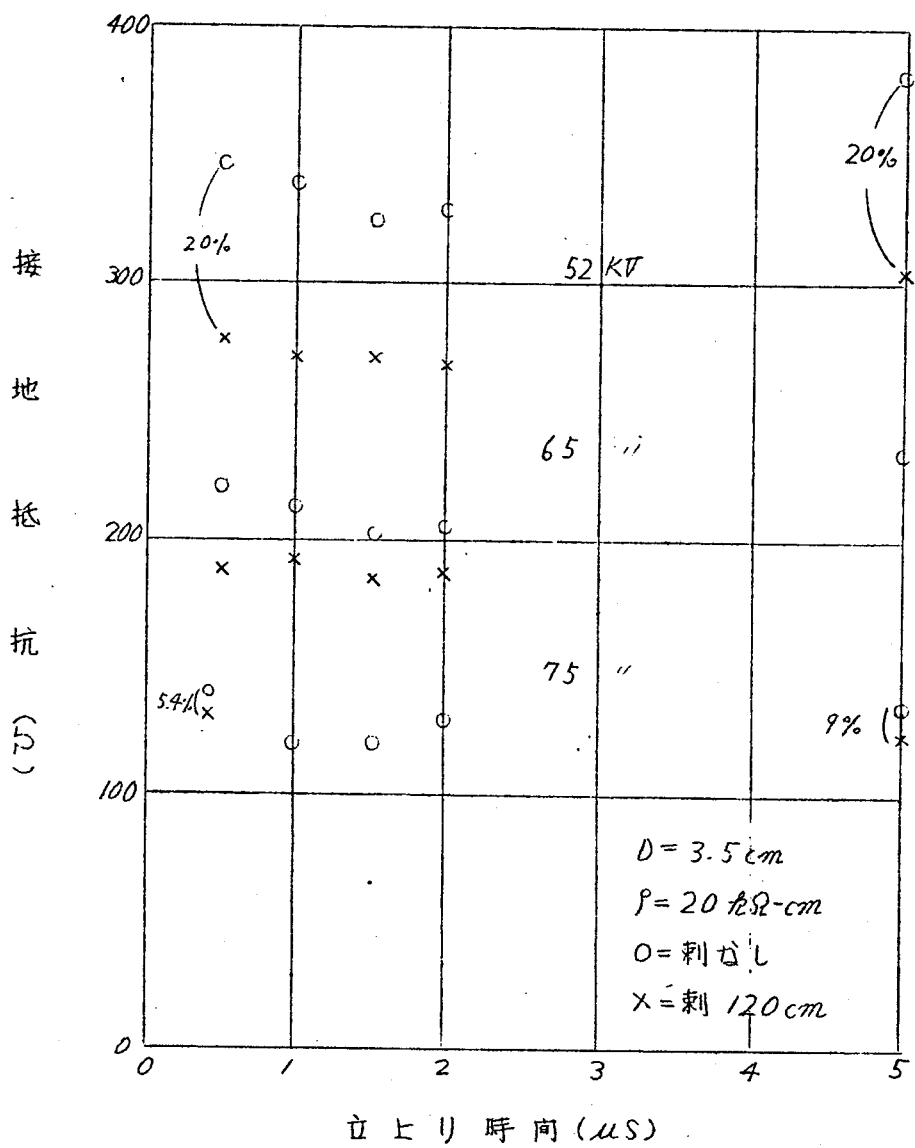
a 電圧の波頭長と刺の効果

第 7-12 表は電圧の波頭長 T_f と刺の効果の割合について示す。これより明らかとなる如く、刺の効果は T_f により変化する。

括弧内の数値は刺の効果は抵抗の百分率を示すものであって、 T_f が $1.0 \sim 1.5 \mu s$ の付近で最低の接地抵抗が現われるのは、 T_f は短い程、又波尾長 T_b が長い程刺の効果が大であり、この両者が重畳して効果を示すものであると考えられる。第 7-27 図はこれをグラフにして示すものである。

第 7-12 表 立上り時間と刺の効果 $D=3.5cm$ $P=20 \ell_2 \Omega - cm$

	$T_f (\mu s)$	0.5	1.0	1.5	2.0	5.0
印加電圧 52 $\ell_2 V$	刺 0 cm	348(R) (20%)	339	328	332	384 (20%)
	12 "	279(R)	272	272	270	307
58 "	0 "	268	231	245	269	310
	12 "	226	200	206	228	256
65 "	0 "	220	215	203	205	233
	12 "	188	192	182	186	201
75 "	0 "	130 (5.4%)	120	120	132	135 (8.9%)
	12 "	132	112	115	120	123



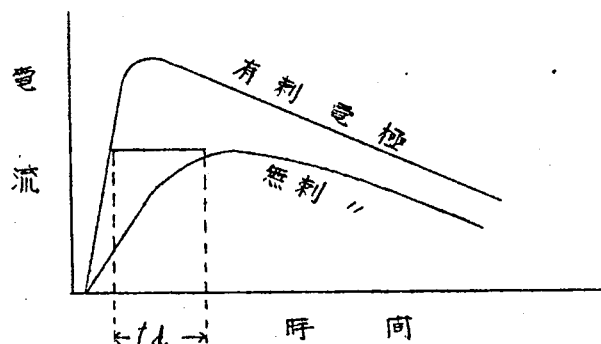
第7-27図 立ち上り時間と刺の効果

6 刺の有無と電流の立上り時間

以上は 刺の有無と電流の立上り時間 刺の有無と電流の立上り時間 の効果を表わすのに、その電流波高値の大小のみを問題にしたが、電流の立上りがおそくては、端子の閃絡時間を考慮に入れる場合、刺の意義が異なる。従って刺の有無の各場合について、同一印加電圧に対する電圧波形を比較し、刺の効果を経時的な面より調べる。

このため7-28図に例示する如く、刺の有無の各場合の電流波形を同一フィルムに重ねてとり、その際の t_d を測定し、これを第5-13表に示す。これは明らかに如く T_f が長くなると刺の効果は大きくなり、全体として刺があれば電流の立上りは早くなり、見かけ上の抵抗にて見られる以上の効果が実際には現われることが判る。この時間効果は、刺の長さの関数であり、従来の実験結果から察すれば、刺の長さと共に時間効果は増加する。

第7-28図
電流立上りの比較の方法



第7-13表 刺が電流の立上りに及ぼす影響 $l=12\text{cm}$, $D=3.5\text{cm}$, $P=12\text{kg/cm}$

52KV	$T_f(\mu\text{s})$	0.5	2.5	5.0	6.8	13
	$t_d(\text{"})$	5	5	5	8	9
58"	$T_f(\text{"})$	1.0	1.3	3.8	3.8	9.0
	$t_d(\text{"})$	6	6	7	7	10
65"	$T_f(\text{"})$	1.5	2.5	3.8	3.8	8.8
	$t_d(\text{"})$	2.0	2.5	2.5	2.5	8
68"	$T_f(\text{"})$	1.4	1.4	2.5	2.9	8.6
	$t_d(\text{"})$	3	6	6	6.5	7
75"	$T_f(\text{"})$	1.0	2.5	3.8	4.4	8.8
	$t_d(\text{"})$	4	5	4	5	4

C 電圧の立上り時間とストリーマ平均進展速度

前記の中間電極により、ストリーマが中心電極より10cmの距離に到達するまでの時間を示せば、第7-14表の如くである。

これより明らかな如く、有刺電極に於けるストリーマの進展速度は、無刺電極のそれの約2倍であるということができる。測定方法の便宜上、刺の長さを1cmに抑えたが、刺の長い場合には、更に速度は増加するものと期待される。ストリーマの速度の増加は、接地抵抗の低減効果を時間的に早めるのに効果がある。

第7-14表 ストリーマの到達時間 $D=3.5\text{cm}$, $P=20\text{kg-cm}$

	$T_f(\mu\text{S})$	1	1.5	3.0	6.0
印加電圧 68kV	刺 0cm	6 μS	7 μS	11 μS	14 μS
	1 "	2.4 "	3.0 "	5 "	8.6 "
60 "	0 "	15 "	—	13 "	16 "
	1 "	4 "	4 "	5 "	8.4 "
52 "	0 "	18 "	20 "	20 "	—
	1 "	9 "	12 "	20 "	23 "

注. 中間電極半径 10 cm

§5 有刺電極の接地抵抗に関する考察

衝撃大電流に対する有刺電極の接地抵抗は、土中ストリーマの発生を考慮し、また電極相互の影響を加えて、式(1-13)を改め、次式を得る。

$$\frac{1}{R_{ioe}} = \frac{1}{R_{io}} + \frac{1}{R_{ie}} - \frac{1}{R_{ie}} \quad (7-5)$$

但し添字 i は衝撃電流に対する接地抵抗を表わす。

上式の右辺第3項は刺の存在により電流が刺附近に集中し、球電極の接地抵抗が増大することを示す。

また公知の如く

$$R_{io} = \frac{R_o^m}{(AV+B)^{m'}}$$

但し、 A, B, m, m' : 定数

R_o : 球状電極の定常接地抵抗

即ち、印加電圧が一定であれば

$$\frac{1}{R_{io}} = C_1 \cdot r_o^m$$

但し、 C_1 : 電圧の関数

r_o : 球状電極の半径

また R_{il} 及び R'_{il} は刺の長さ及び球状電極の大きさに関係する。

即ち

$$\frac{1}{R_{il}} = C_2 \cdot l \cdot r_o^n \quad (7-6)$$

$$\frac{1}{R'_{il}} = C_3 \cdot l \cdot r_o^8 \quad (7-7)$$

但し、 C_2, C_3 : 定数

式(7-5) ~ (7-7) より

$$\frac{1}{R_{ioe}} = r_o^m \cdot C_1 + k \cdot l \quad (7-8)$$

但し、 $k = (r_o^r C_2 - r_o^8 \cdot C_3)$

又は

$$\log R_{ioe} = \log R_{io} - l \left(r_o^{m-n} \frac{C_2}{C_1} - r_o^{8-m} \frac{C_3}{C_1} \right) \quad (7-9)$$

$$\text{但し、} l \left(r_o^{n-m} \frac{C_2}{C_1} - r_o^{8-m} \cdot \frac{C_3}{C_1} \right) \ll 1$$

C_2, C_3 は電圧に対し殆んど変化しないから、式(7-6)にて表わされる直線群は電圧をパラメータとして平行となり、第7-21~22図に示す実験結果と一致する。また C_1 は印加電圧と共に増大し、従って式(7-9)

の右辺第2項の ϵ の係数は減少し、第7-15、16図に示す如き特性となる。

これらの実験結果より式(7-7, 8)の各定数を実験により求めれば、第7-15表に示す如くである。

第7-15表 諸 定 数 (球状電極)

$P(\text{cm})$	m	n	g	C_2	C_3
$P=61.7$	0.5	-0.8	-1.5	3.66	4.22
160	"	"	"	3.78	4.35
270	"	"	"	5.29	6.08
1300	"	"	"	6.35	7.32

これらの数値により式(7-8)により ϵ の値を計算し、測定値と比較すれば、第7-29図の如くであり、両者の傾向は良く一致している。

また有刺電極に於いて、刺により増加するコンダクタンスと、刺が無い場合の接地電極のコンダクタンスとの比を以て、刺の効果 ϵ とすれば

$$\epsilon = \frac{\frac{1}{R_{io2}} - \frac{1}{R_{io}}}{\frac{1}{R_{io}}} = R_{io} \left(\frac{1}{R_{io2}} - \frac{1}{R_{io}} \right) \quad (7-10)$$

上式に於いて電圧の上昇に対し R_{io} は減少し、また $\left(\frac{1}{R_{io2}} - \frac{1}{R_{io}} \right)$ は一定であるから、 ϵ は電圧の上昇に対し減少することとなる。

有刺環状電極の場合も式(7-5)を適用できるが、電極が球状の場合に較べて大きいから、右辺第3項を考慮しなくて良い。また球状電極の場合の直径 $2r_0$ に対応する変数としては、交流に対する環状電極の接地抵抗(R_r)の逆数 $g_0(\omega)$ を採用する。即ち

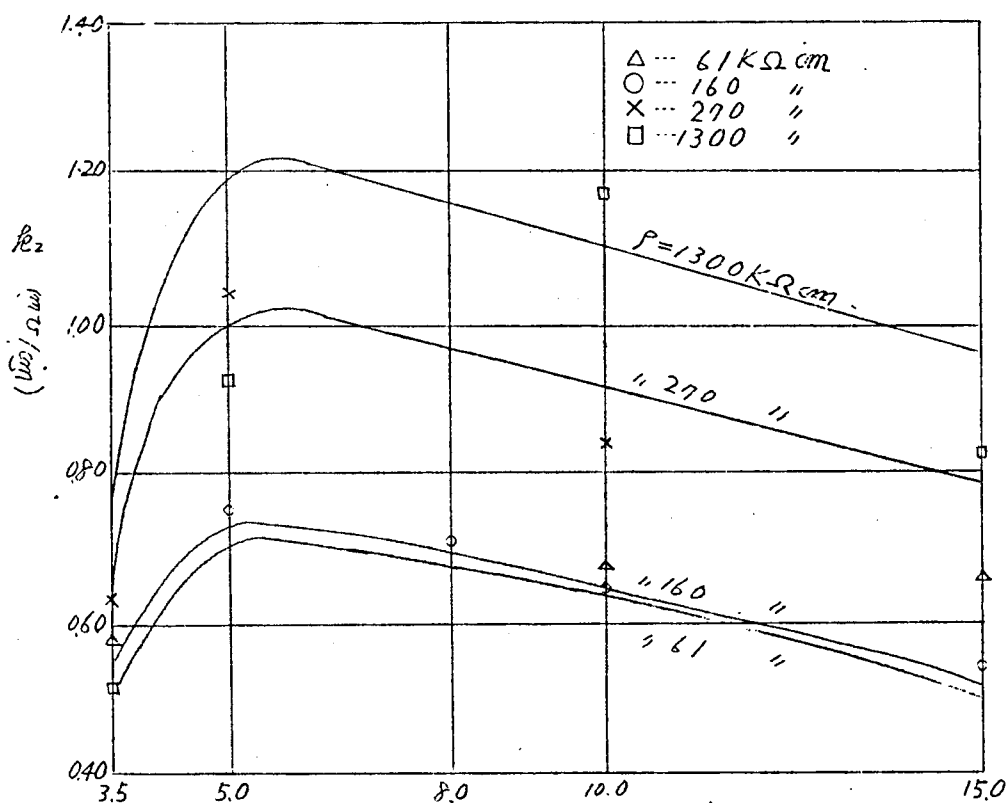
$$R_r = \frac{1}{g_0} = \frac{P}{2\pi} \frac{1}{\pi r} \ln \frac{8r}{a} \quad (7-11)$$

但し r : 環の直径

a : 環を作る円環の半径

これらの式に従い、第(7-26)図の測定値より $n=-1.0$, $C_2=0.5$, $C_3=0$ を得るから

$$k_2 = \frac{C_2}{g_0} \quad (7-12)$$



中心電極の直径 (cm)

第7-29図 k_2 の測定値と実験式との比較

第8章 接地電極の周辺に木炭粉を配置する際の接地抵抗

§1 概 説

前記の如く、*Norinder* は接地電極の周辺に木炭粉や鉄粉等を配置することにより、その接地抵抗の低減効果が大きくなると述べている。この際の土中ストリーマの発生状況を埋設フィルムより観察し、また木炭粉と低減効果との関係を測定した。

§2. 木炭粉の含有率を変化する場合

第1表に示す如き5種の混合率により木炭粉と赤土とを混合した。

第8-1表 木炭と土の混合率

種別	木炭粉(体積)	赤土(体積)
1	0 %	100 %
2	25 "	75 "
3	50 "	50 "
4	75 "	25 "
5	100 "	0

百分率は混合体の全体積(6750cc)
に対する比

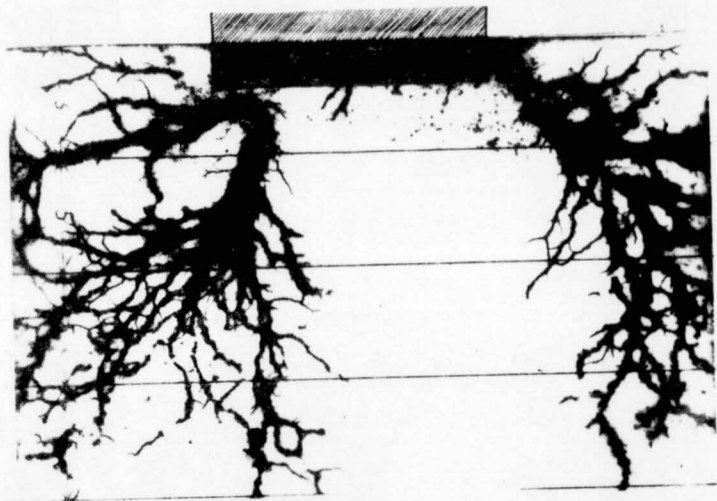
炭素粉の重量 360g/1,000cc

赤土の重量 1,100g/1,000cc

この混合体の固有抵抗は、商用周波の交流に対しては極めて高い値を示し $Mr\text{-cm}$ 程度である。しかし、衝電流に対しては低くなり、特に木炭粉のみの場合には殆んど導体となるものと考えられる。

これを8-1図に如す如く、中心電極と同心的に配置し、衝電圧に対する接地抵抗を測定した結果は、第8-2

図に示す如くであり、或る含有率にて抵抗は最大値を示し、木炭の含有率を増加することは必ずしも接地抵抗を減少させることにはならないことを示す。これは土中に炭素粉を含むことにより、衝電流に対する ρ が減少し、従って電極周辺の電界が低下し、ストリーマの発生が抑制さ



(a) 木炭粉 100%



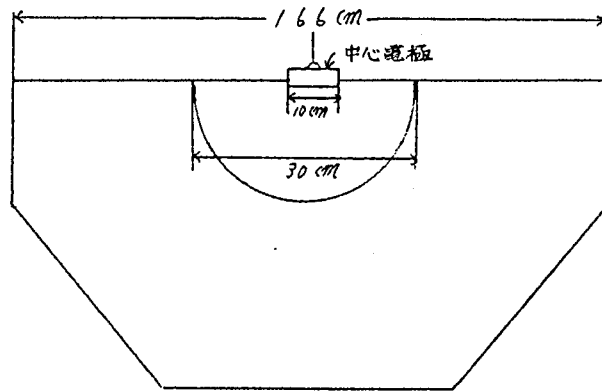
(b) 木炭粉 50%



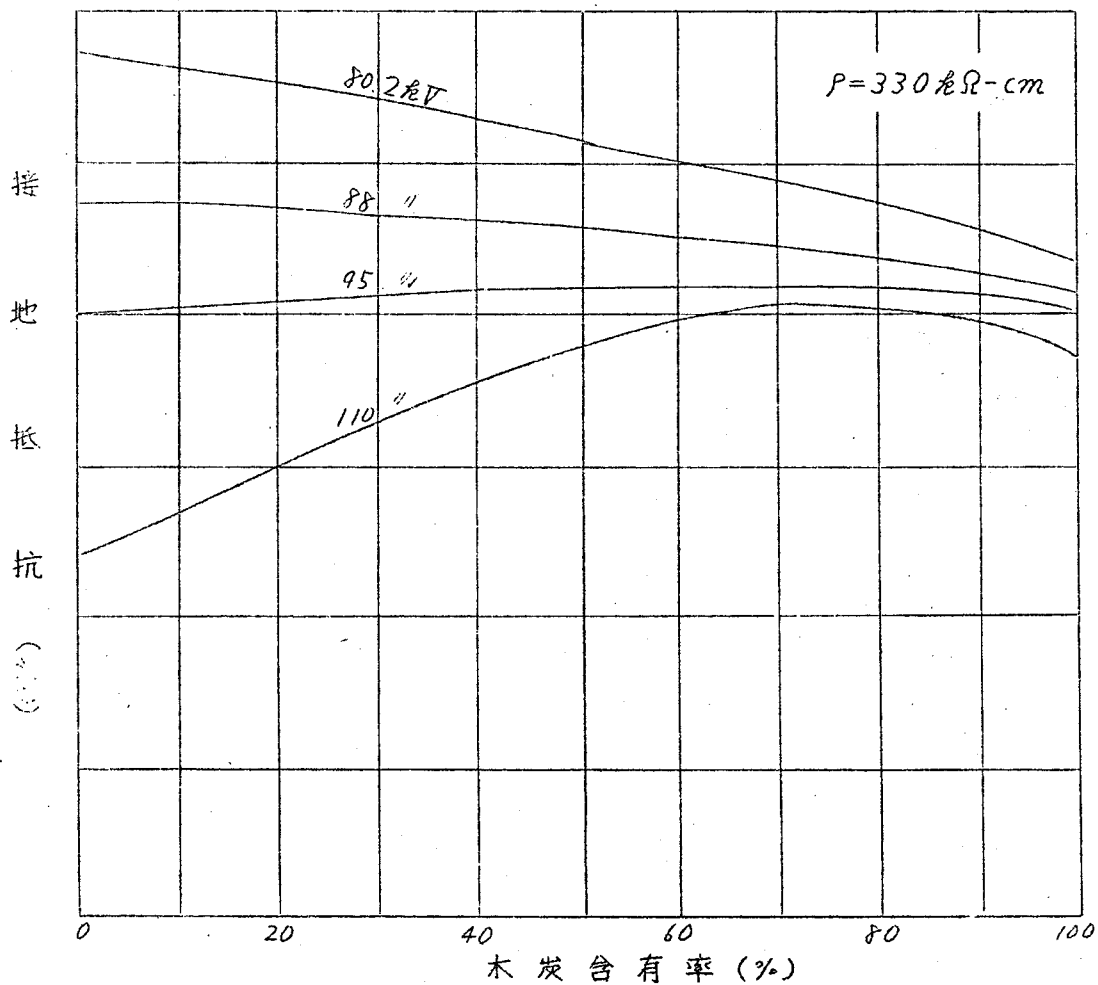
(c) 木炭粉 100%

第8-3図 木炭粉中のストリーマ像

$\rho = 330 \text{ K}\Omega\text{-cm}$ $V = 80 \text{ KV}$



第8-1 図 中心電極、外部電極、及び木炭の
配置状態



第8-2図 木炭粉を土に混合した際の接地抵抗

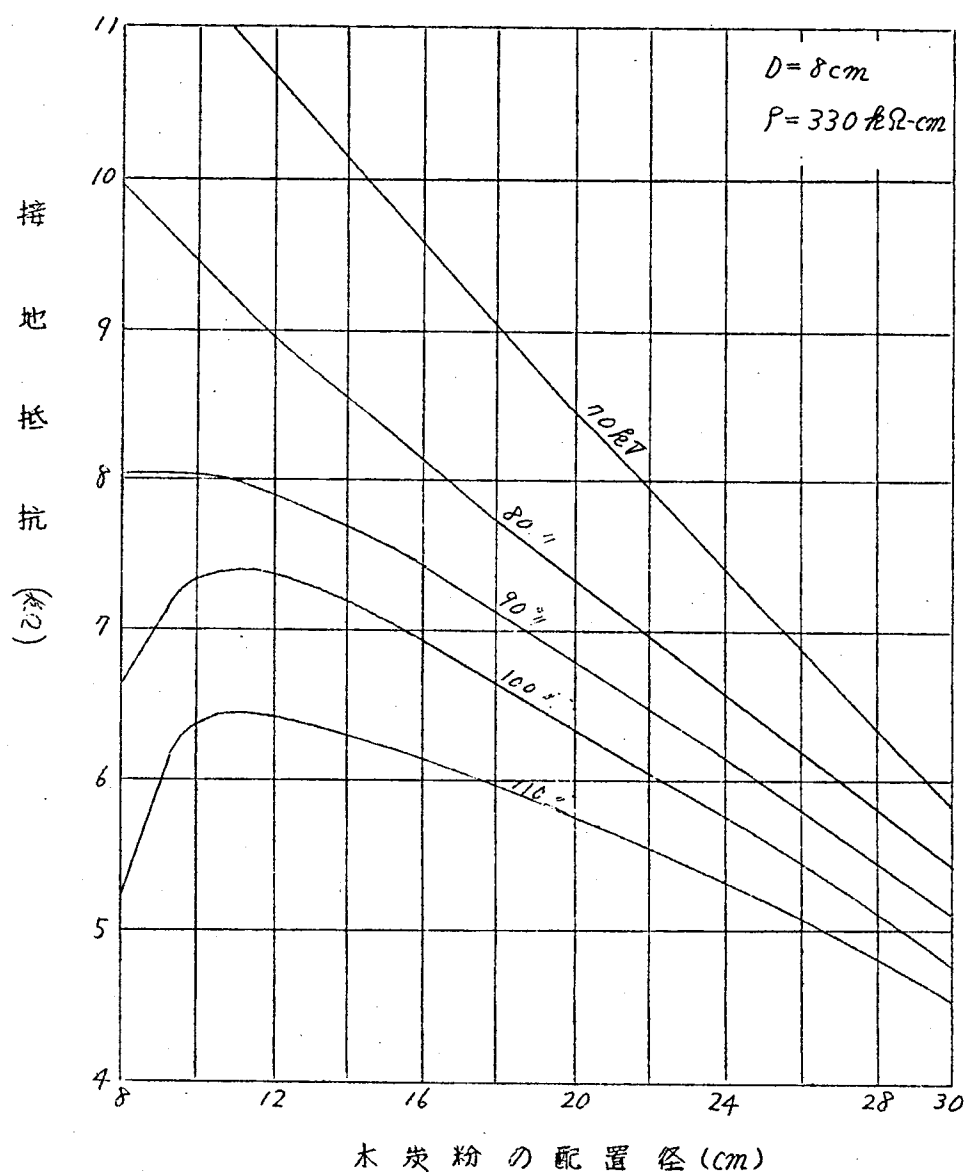
れることと、他方 ρ の低下により、排流が容易になることが、夫々相反する要素として作用し、接地抵抗に最大値が現われるものと考えられる。而して、印加電圧が充分低い場合は、土中ストリーマの発生が小さく、専ら木炭粉の含有率が接地抵抗に影響を与え、従って最大値はなく、単調減少となる。

埋設フィルムにより、この際のストリーマを観察すれば、第8-3図に示す如く、(a)木炭粉のない場合は、土中ストリーマは約20cmの長さに成長し、(b)木炭粉を5%含む場合は約直径10cmの円坪状範囲に黒臭が僅かに存在するのみとなり、(c)100%の木炭配置の際には、この部分が一杯は導体と化す。ことが解る。

§3. 木炭粉の配置の直径を変化する場合

木炭粉を土と混することなく、そのまま接地電極の周辺に配置し、その配置の直径を変化する場合の接地抵抗につき記する。

直径8cmの中心電極の周辺に、これと同心的に木炭粉を半球状に配置し、その直径を8~30cmに変化する場合の接地抵抗は第8-4図の如くである。この場合も前節と同様の理由により、印加電圧が低い場合は、その接地抵抗は木炭粉の配置径の増加に従い単調に減少し、又印加電圧が増加すると、木炭粉の配置径の或る値で最高値を示し、その後減少する。接地抵抗が最大になる如き木炭粉の配置径は、電圧の増加と共に増大する。



第8-4図 電極の周辺に木炭を置き、その直径を
 変化する際の接地抵抗

第9章 コンクリート電極の接地抵抗

§1. 概 説³³⁾

鉄塔のコンクリート基礎がその接地抵抗の低減に寄与していることは公知³⁴⁾の如くであるが、塔脚の打込みは深く、接触面積も大きいから、そのコンクリート部を雷電流に対し導電的ならしめることができれば抵抗の低減効果は大となる。このためコンクリートに少量の添加物を混入してその電氣的並ひに機械的性質を測定する。

§2. コンクリート電極

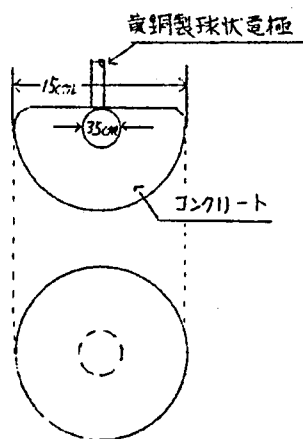
本実験に於ける接地電極は、第9-1図に示す如く、黄銅製球状電極を中心とし、これと同心的にコンクリートを球状に形成したものを使用した。これにより、鉄塔のコンクリート基礎を電氣的に模擬する。コンクリートの組成は第9-1表に示す。

第9-1表 コンクリートの組成

セメント	砂	砂利	水	α^*
1	2	4	0.6	0~0.4

*注： α は添加物のセメントに対する重量比

尚 添加物としては、木炭粉、酸化鉄粉、チタン酸バリウム粉、銅粉、黒鉛、及び食塩等を使用し、コンクリートは2週間水中養生の後、2週間気中乾燥し、材令4週間として使用した。



第9-1図 コンクリート電極

§3. コンクリート電極の接地抵抗の測定結果

前記のコンクリート電極を土壌容器の中心に同心的に置き波高値が60～120 Ω の衝撃電流を印加した結果は第9-2～7表及び第9-2～7図に示す如くであり、その接地抵抗は公知の如く電圧により変化し、且つ添加物の量及び種類により大巾に変化する。

これらの特性を一括して表示し、且つ土の比抵抗が異なる場合のコンクリート電極間の比較を可能ならしめるため、コンクリートの抵抗の低下率を次式の如く定義する。

$$D_{\alpha} = \frac{R_{\alpha} - R_m}{R_0 - R_m} \times 100 (\%) \quad (9-1)$$

但し R_{α} : 添加物の含有率 α の場合のコンクリート電極の接地抵抗

R_0 : 添加物の含有率 0 の場合のコンクリート電極の接地抵抗

R_m : 直径 15 cm の黄銅製球状電極の接地抵抗

D_{α} により添加物の効果を表わせば、電圧及び土の比抵抗に殆んど無関係な数値となり、実験結果より、第9-8, 9図を得る。

第9-2表 コンクリート電極の接地抵抗 (Ω) 木炭含有 $P=160 \text{ ㏪-cm}$

$\alpha(\%)$ 電圧	60	70	80	90	100	110	120
0	5830	4990	3720	2370	1530	1030	780
0.5	5580	4780	3650	2190	1420	940	740
1.0	5600	4800	3670	2200	1430	950	750
2.5	5700	4880	3670	2300	1500	1100	770
5.0	6120	5220	3970	2500	1590	1050	800
10.0	5390	4670	3440	2110	1370	930	740
20.0	5210	4470	3300	2000	1270	850	710

第9-3表 コンクリート電極の接地抵抗(Ω) 酸化鉄粉含有 $P=180 \text{ ㏪-cm}$

$\lambda(\%) \backslash \text{電極}$	60	70	80	90	100	110	120
0	4920	4030	3150	2400	1810	1390	1160
1	4780	3890	3040	2330	1750	1330	1090
2.5	4450	3650	2900	2250	1690	1290	1030
5	4220	3500	2780	2180	1670	1270	1020
10	4570	3750	2950	2280	1730	1340	1050
20	4110	3400	2720	2140	1630	1250	1010
40	3900	3240	2590	2030	1550	1200	970

第9-4表 コンクリート電極の接地抵抗(Ω) 4%酸バリウム粉含有 $P=130 \text{ ㏪-cm}$

$\lambda(\%) \backslash \text{電極}$	50	60	70	80	90	100	110
0	3970	2920	1960	1210	880	710	640
1	3700	2700	1800	1140	840	680	610
2.5	3340	2410	1590	990	730	600	560
5	3520	2570	1710	1060	790	640	600
10	3740	2700	1800	1130	840	680	620
20	3320	2310	1530	990	730	590	540
40	3260	2280	1490	960	700	570	520

第9-5表 コンクリート電極の接地抵抗(Ω) 銅粉含有 9 ㏪-cm

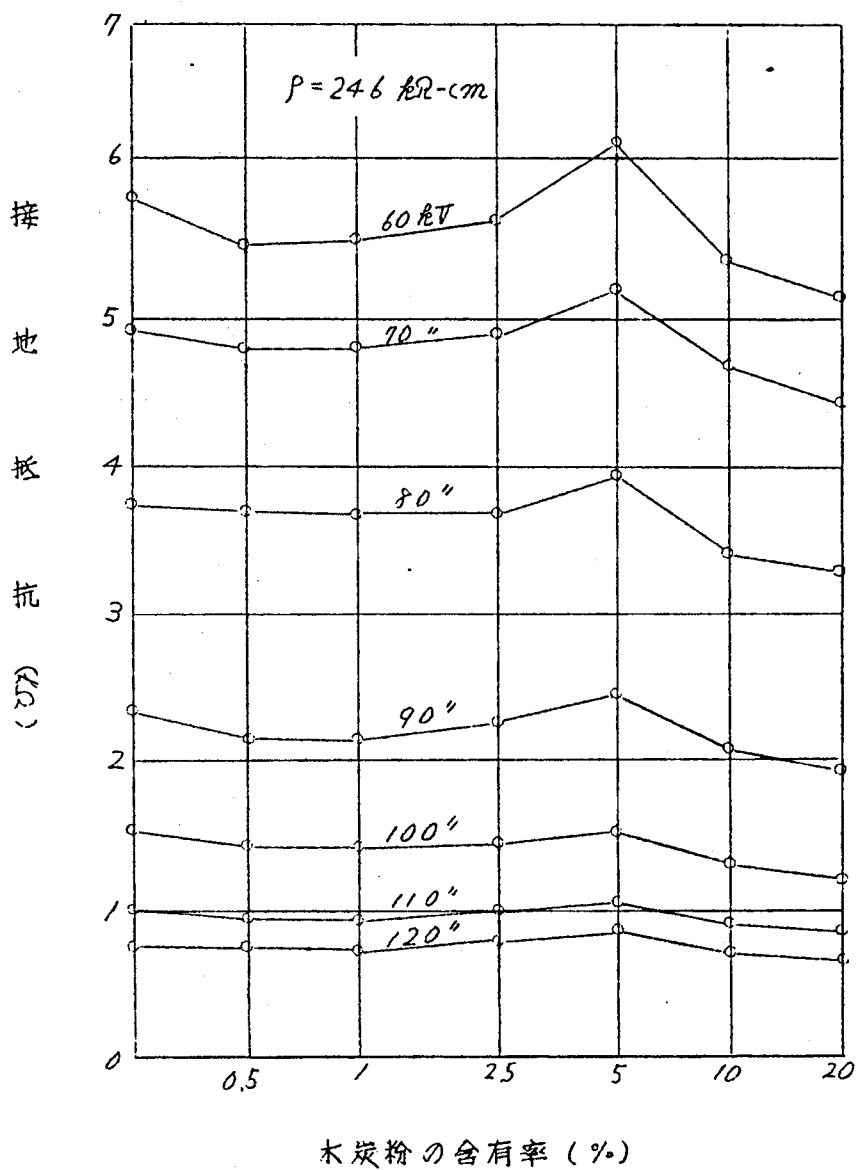
$\lambda(\%) \backslash \text{電極}$	60	70	80	90	100	110	120
0	3400	2820	2240	1740	1300	960	780
1	3400	2830	2280	1790	1340	980	800
2.5	3600	2960	2360	1840	1400	1040	840
5	3700	2170	2520	1960	1500	1100	880
10	3240	2640	2080	1580	1160	840	660
20	3050	2500	1870	1500	1100	800	630
40	2800	2200	1700	1280	900	660	520

第9-6表 コンクリート電極の接地抵抗(Ω) 食塩含有 $\rho=160 \text{ } \Omega\text{-cm}$

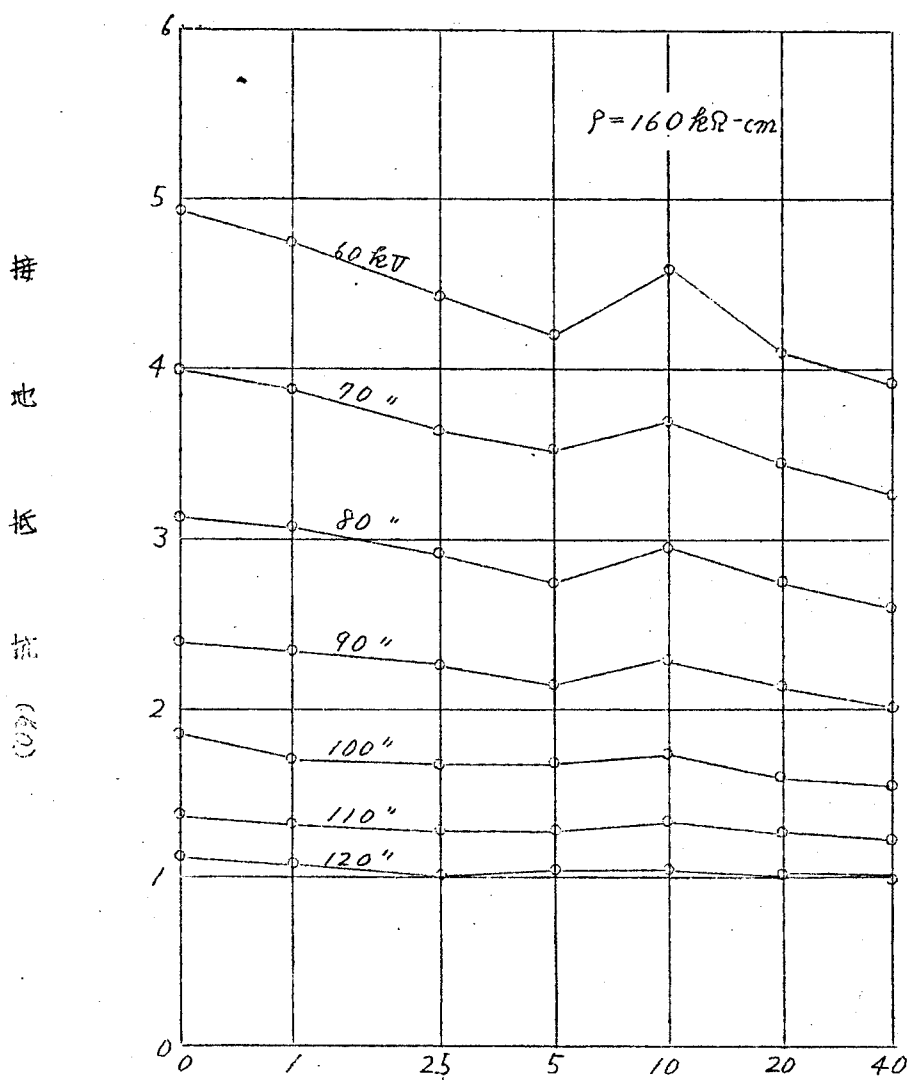
$\chi(\%) \backslash \text{電圧}$	60	70	80	90	100	110	120
0	5700	4190	3050	2300	1740	1320	1040
0.5	4500	3170	2400	1820	1400	1100	910
1	4800	3370	2520	1930	1480	1150	930
2	4950	3440	2580	1980	1520	1180	960
4	3750	2750	2100	1590	1210	940	780
8	2900	2090	1600	1220	940	770	680

第9-7表 コンクリート電極の接地抵抗(Ω) 黒鉛含有 $\rho=87 \text{ } \Omega\text{-cm}$

$\chi(\%) \backslash \text{電圧}$	60	70	80	90	100	110
0	2240	1910	1640	1440	1310	1220
0.5	2070	1760	1500	1280	1130	1040
1	2130	1820	1560	1340	1190	1090
2.5	1990	1670	1400	1180	1020	920
5	1900	1590	1330	1110	960	860
10	1810	1510	1240	1020	870	780
20	1710	1390	1090	890	770	700
40	1490	1120	870	730	640	580
80	1310	960	710	560	470	410
金取状	1110	720	520	400	310	270

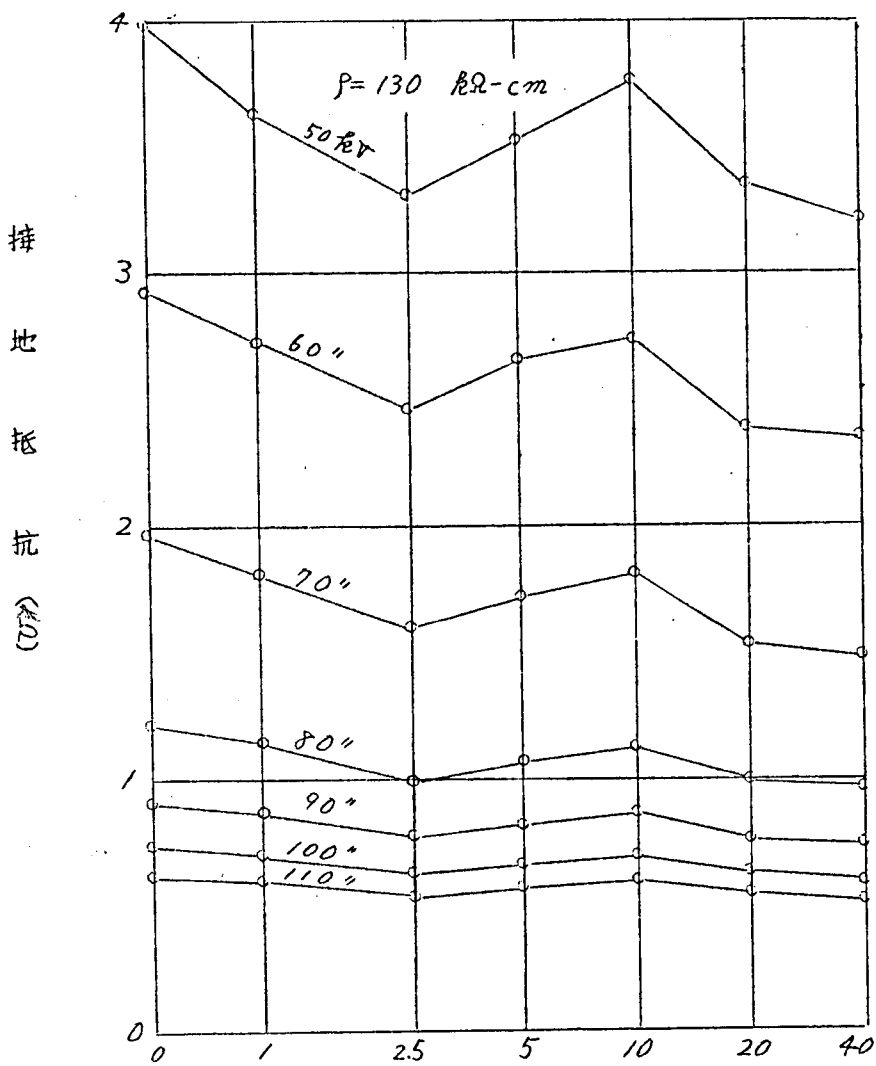


第9-2図 コンクリート電極の接地抵抗
(木炭含有の場合)

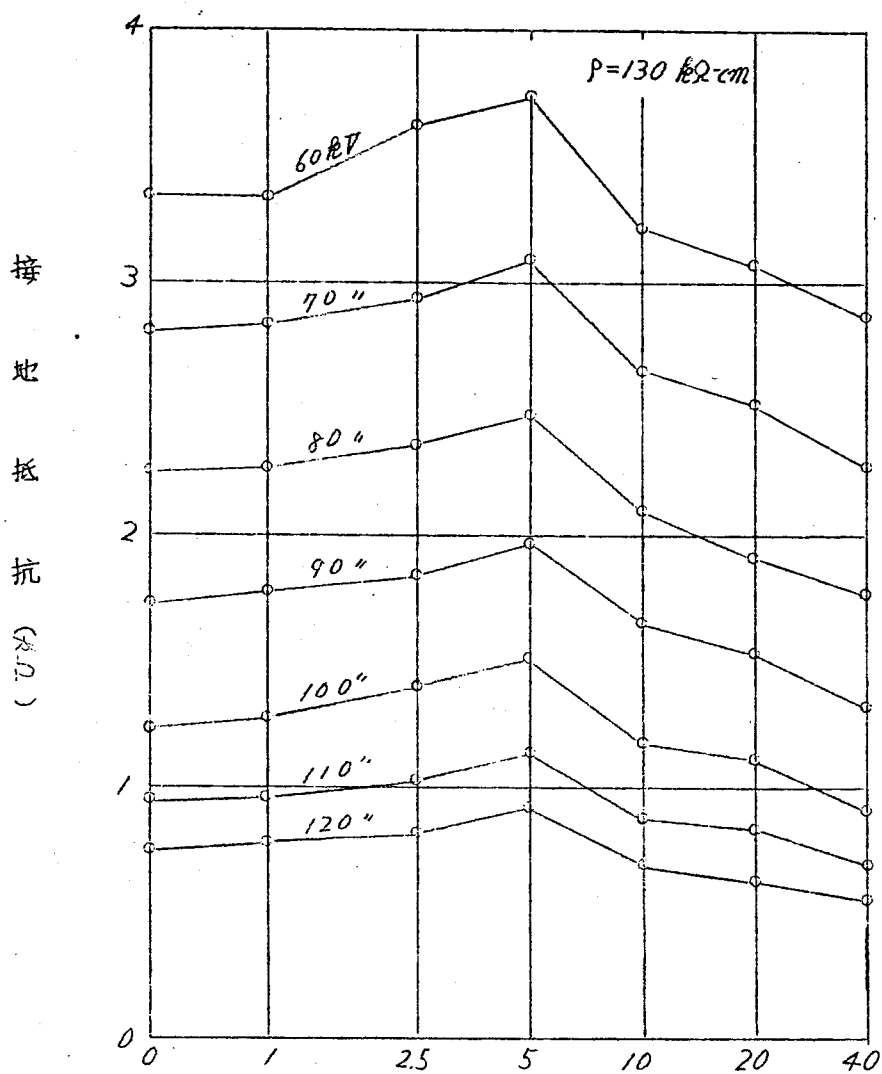


酸化鉄粉の含有率 (%)

第9-3図 コンクリート電極の接地抵抗
(酸化鉄粉の含有率)

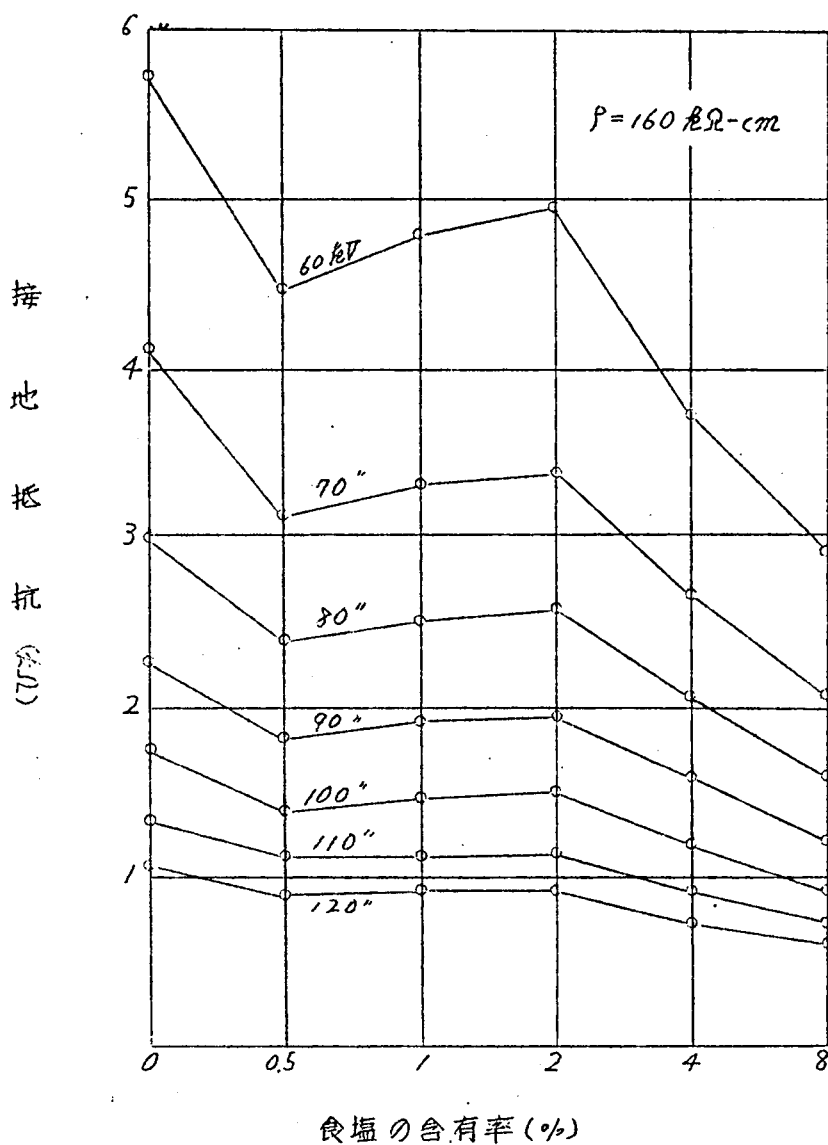


第9-4図 コンクリート電極の接地抵抗
(チタン酸バリウム粉含有の場合)

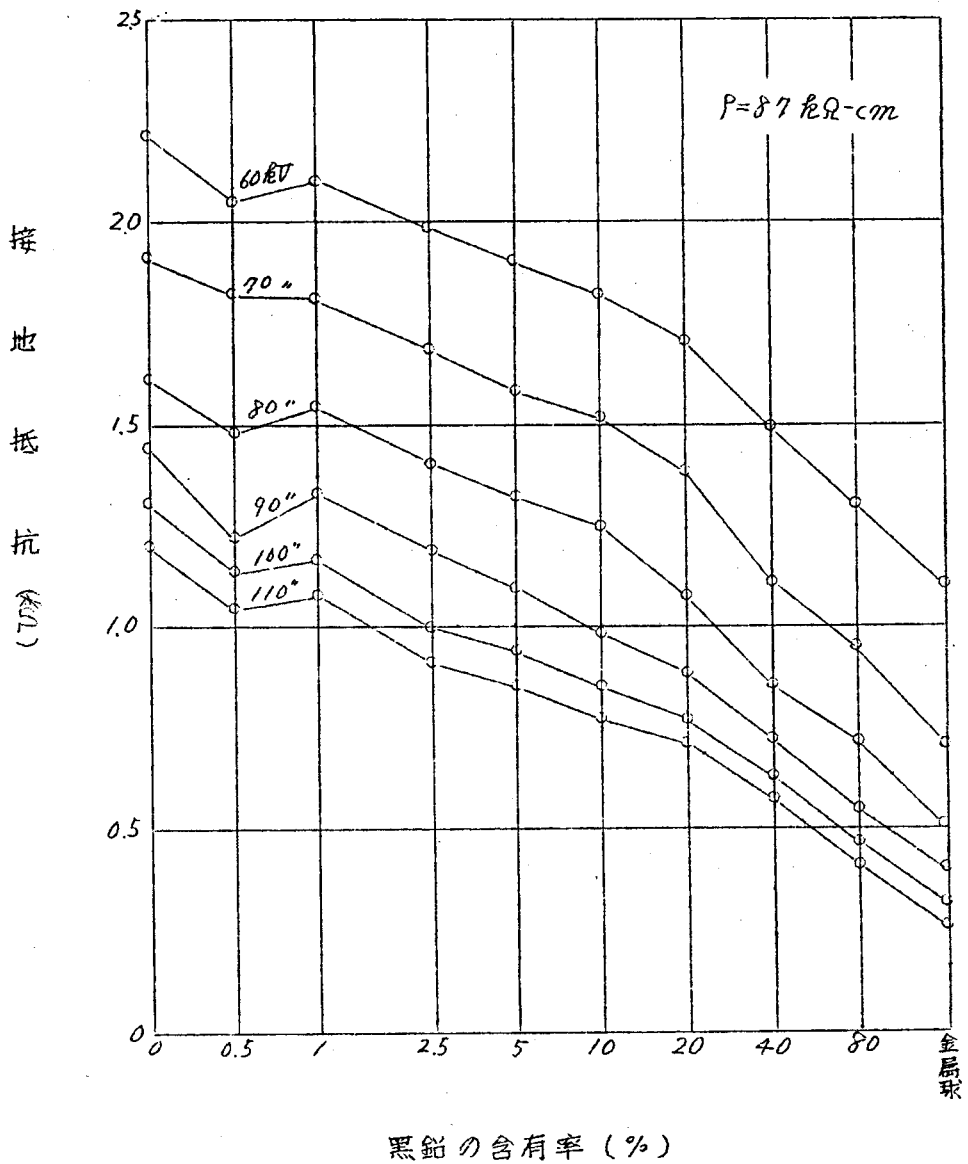


銅粉の含有率 (%)

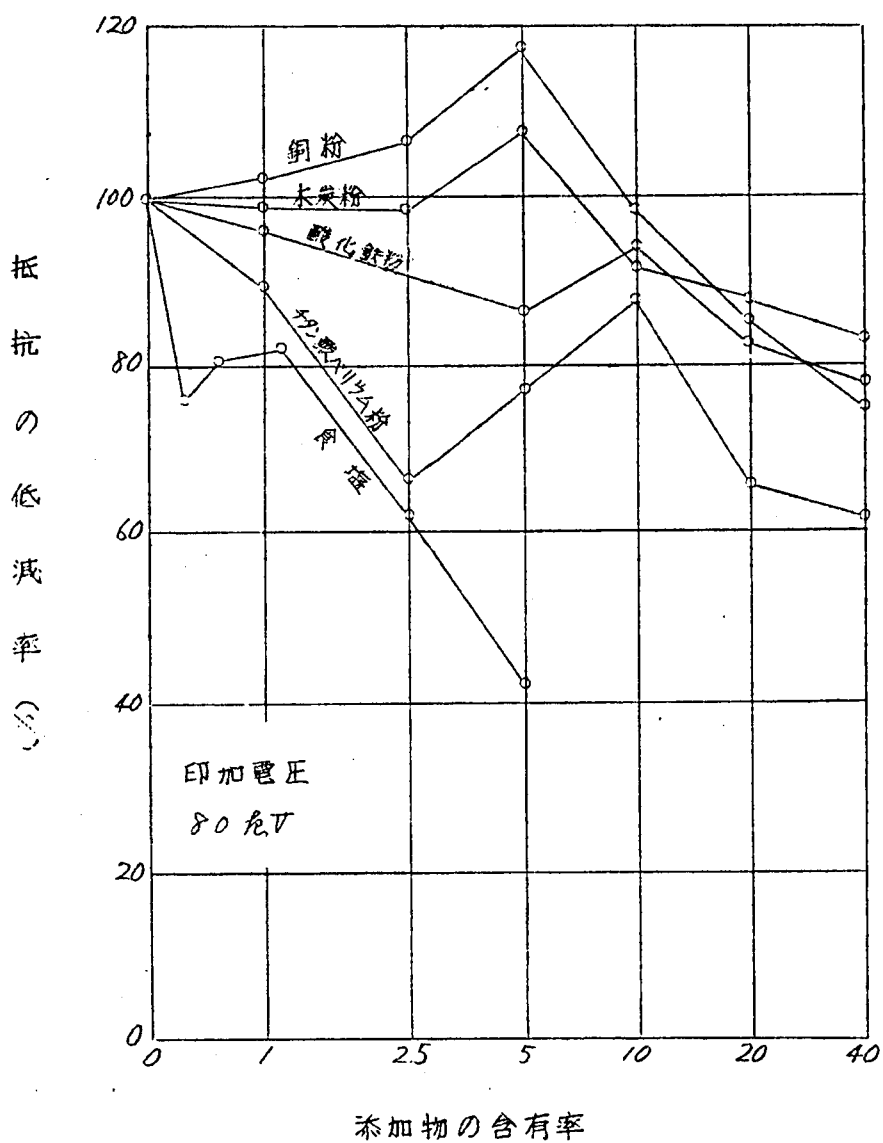
第9-5図 コンクリート電極の接地抵抗
(銅粉含有の場合)



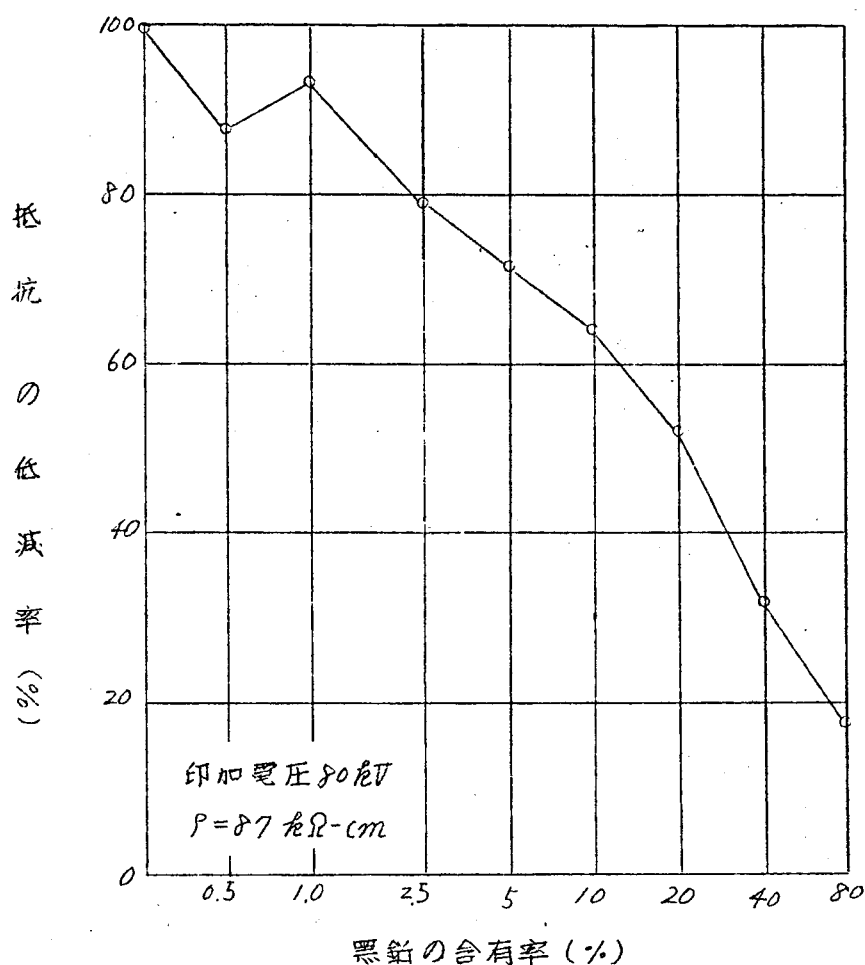
第 9-6 図 コンクリート電極の接地抵抗
(食塩含有の場合)



第9-7図 コンクリート電極の接地抵抗
(黒鉛含有の場合)



第9-8図 各種コンクリートの抵抗低減率



第9-9図 コンクリート抵抗低減率
 (黒鉛含有の場合)

但し、第7-1図は特に効果顕著なる黒鉛を示す。これより明らかな
 如く食塩及びチタン酸バリウムノ効果が最も大であり、これは夫々導電
 率及び比誘電率が大さいことによるものと考えられる。

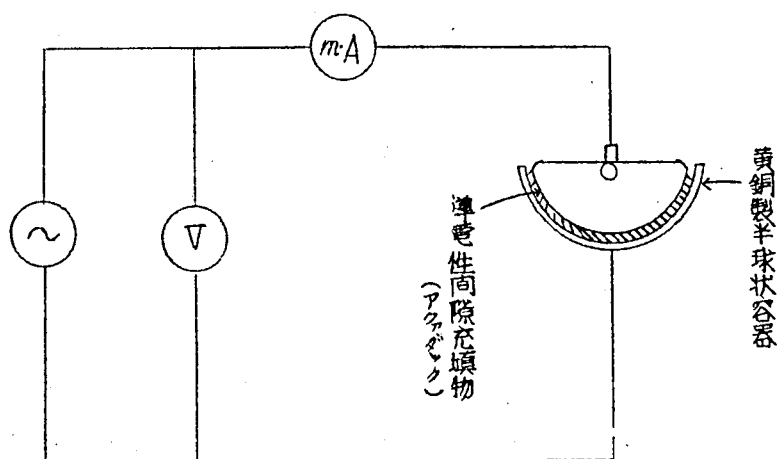
これらのコンクリートの交流に対する抵抗を測定し、比抵抗を算出す
 れば、第8表の如くであり、衝電流に対する変化に比べると大きな変動
 はない。また土の比抵抗に比べて低い。この電極の接地抵抗が衝電流

に付して土よりも大きいのは、その破壊電位傾度が土の約10倍であるため、ストリーマが発生し難いためと考えられる。

この時の測定回路を第9-10図に示す。

第9-8表 コンクリートの比抵抗 ($\Omega\text{-cm}$)

添 加 物	α	比抵抗	添 加 物	α	比抵抗
木 炭 粉	0%	73	酸 化 鉄 粉	25%	92
〃	2.5	71	〃	20	77
〃	20	85	4タン酸バリウム粉	5	73
銅 粉	10	70	〃	40	80
〃	40	90	食 塩	4	60



第9-10図 コンクリートの比抵抗の測定

§4. コンクリートの電位破壊傾度

第9-10図に示す回路に於いて電圧計、電流計を除き、その両電極に衝量電圧を印加し、始めてコンクリートが破壊する電圧波高値を以て破壊電圧とする。この時ストリーマが中心電極より同心的に発生し、その半径が r とあると仮定すれば、その先端の電位傾度は

$$g = \frac{V_0}{r(1-r/a)}$$

但し g : ストリーマ先端の電位傾度

V_0 : 印加電圧

r を変数とする時の最少電位傾度 g_{min} は

$$g_{min} = g(r = \frac{r_0}{2}) = \frac{4}{r_0} V_0 \quad (1-2)$$

この g_{min} を以て、コンクリートの最少破壊電位傾度とする。その測定の結果を第9-9表に示す。これによれば、多少のばらつきはあるが、一般にコンクリートの破壊電位傾度は $20 \sim 30$ 電V/cm と言うことがせざる。

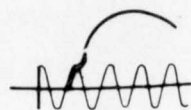
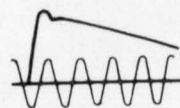
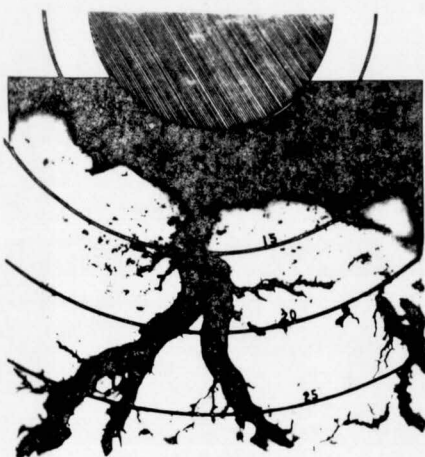
§5. コンクリート電極より発生する土中ストリーマ

a. 土中ストリーマ像

鉄塔のコンクリート基礎の接地抵抗が衝量大電流に対して低減効果を示すのは、コンクリート中に発生するストリーマが土中にのびる為である。前記の假設フィルムにより、これを観察すれば、第9-11図(a)の如くであって、これに対応する電圧電流は同図(b)の如くであって、ストリーマが土中に突入した瞬間に電流は急躍的に増大するものと考えられる。

b. コンクリート中のストリーマ進展速度

後記の如く、コンクリート破壊電位傾度は、その厚さにより変化する



(a) コンクリート電極より
発生するストリーマ

(b) 電圧, 電流波形

第 9-11 図 土中ストリーマ像と電圧, 電流波形
 $\rho = 130 \text{ k}\Omega\text{-cm}$, $V = 105 \text{ kV}$, $I = 150 \text{ A}$

が $20 \sim 30 \text{ kV/cm}$ 、また土に於ては $2 \sim 10 \text{ kV/cm}$ であるから、土と比較してコンクリートは破壊し難く、従ってストリーマの進展速度も遅い。前項の電圧、電流のオシログラム(第9-11図)より明らかな如く、コンクリート中のストリーマが土中に突入すると電流波形に飛躍を生ずるまでの時間を、コンクリート中のストリーマの伸展時間と考えれば、これよりその平均速度を測定することができる。第9-10表は印加電圧 105 kV 、 $\rho = 130 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ に於けるストリーマ進展速度であって、一般に土中ストリーマの速度は $10 \text{ cm}/\mu\text{s}$ 程度であることを考慮すれば、この値は土中のものの約 $1/10$ である。

第9-9表 コンクリート電極の破壊(V_B : 破壊電圧, g_B : 破壊電位傾度)

	添加率(%)	0	0.5	1.0	2.5	5	10	20
木炭粉	$V_B (\text{kV})$	28	41	32	20	20	20	35
	$g_B (\text{kV/cm})$	14.9	21.8	17.1	10.7	10.7	10.7	18.7
酸化鉄粉	$V_B (\text{kV})$	28	34	23	—	32	14	28
	$g_B (\text{kV/cm})$	14.9	18.3	12.2	—	17.2	7.5	14.9
タングステン破粉	$V_B (\text{kV})$	68	45	70	60	70	70	—
	$g_B (\text{kV/cm})$	36.3	24.0	37.3	32.0	37.3	37.3	—
銅粉	$V_B (\text{kV})$	—	27	28	38	30	18	28
	$g_B (\text{kV/cm})$	—	14.4	14.9	20.2	16.0	9.6	14.9
食塩	$V_B (\text{kV})$	30	37	24	27	24	50	—
	$g_B (\text{kV/cm})$	16	19.7	12.8	14.4	12.8	26.6	—

第9-10表 コンクリート中のストリーマの進展速度 ($\text{cm}/\mu\text{s}$)

$$V = 105 \text{ kV} \quad \rho = 130 \text{ k}\Omega\text{-cm}$$

添加物 \ α (%)	1.0	2.5	5.0	10.0	20.0	40.0
木炭粉	0.85	1.36	1.43	1.43	0.90	—
酸化鉄粉	1.43	1.43	0.72	1.43	1.14	1.43
添加物 \ α (%)	0	0.6	1.0	2.0	4.0	8.0
食塩	1.43	0.57	1.27	1.14	—	—

C コンクリート電極周辺の土壌の電位破壊

第9-12図に於いて中心電極と容器間に電圧を印加すると、コンクリートに加わる電圧は、その各々の抵抗に比例する。即ち

$$V_c = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_0 \quad V_e = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_0$$

但し、 V_c , V_e : 夫々コンクリート及び土に加わる電圧

V_0 : 全印加電圧

R_1 , R_2 : 夫々コンクリート及び土の抵抗

実際によれば

$$R_1 \doteq 500 \Omega$$

また土の比抵抗 (ρ) を $200 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ とすれば

$$R_2 \doteq 4.0 \times 10^3 \Omega$$

これより

$$V_c = 0.115 V_0 \quad V_e = 0.885 V_0$$

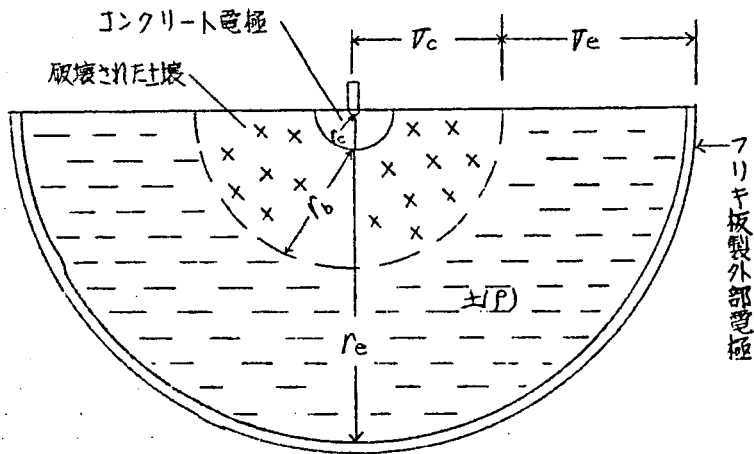
また電極中心より半径 r の点の電位傾度を E とし、コンクリート及び土の添字を c 及び e とすれば

$$E_c = \frac{r_0 r_1 V_1}{(r - r_0) r^2} \quad E_e = \frac{r_c r_e V_2}{(r_e - r_1) r^2} \quad (9-3)$$

但し r_0 : 黄銅製電極の半径

r_c : コンクリート電極 "

r_e : 土の容器 "



第 9-12 図 電極周辺の電位取壊

従って

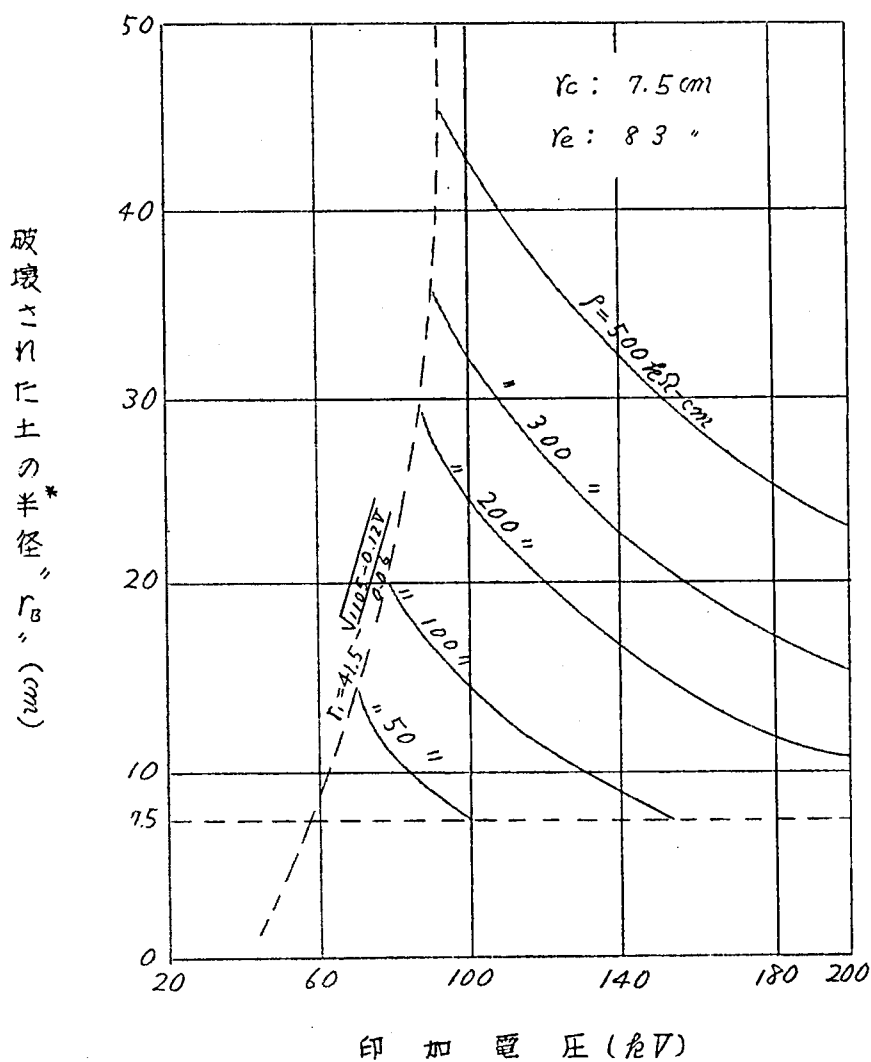
$$E_c(r=r_0)=0.086 V_0 \quad (V_0/cm)$$

$$\cdot E_c(r=r_1)=0.130 V_0 \quad (V_0/cm)$$

これより計算すれば、 $g_c = 30 \text{ 乾V/cm}$ として、 V_0 が350乾V以下ではコンクリートは破壊せず、且つその周辺の土は破壊することとなる。そして、この土の破壊が進むにつれて V_1 と V_2 との配分は変化し、やがてコンクリートが破壊するに至る。このコンクリートの破壊が始まる如き土の破壊半径を印加電圧、土の比抵抗の函数として図示すれば第9-13図の如くなる。但し図の点線より左側及び下側は存在しない。

以上の考察より明らかな如く、中心電極より発生するストリーマが土中に突入するとき、すまにその周辺の土壌は破壊しているので、果たかもストリーマは碗状の金属殻に到達せると同等の効果を生じ、こゝに接地抵抗の不連続的減少即ち電流の飛躍的増加が起る。

これが第9-11図に示す所の電流、電圧波形であると考えられる。



第9-13図 コンクリート電極周辺の土壌破壊

* 第9-12 図参照

§6 有刺コンクリート電極

第9-14図に示す如くコンクリート電極に数本の針金の刺を対称の位置に付け、鉄塔基礎のアース、アングルを電氣的に模擬し、刺の本数及び長さを種々変化してその接地抵抗を測定した。

コンクリートの組成、養生等はすべて前項に従い、添加物を含まない、枚又は四週間である。刺の本数を変化する際の接地抵抗は第9-15図の如くであつて、黄銅製中心電極より、コンクリート表面まで導線を出すことにより、接地抵抗は約40%まで減少する。また刺は二本以上にしてもその効果は小さく、特に電圧の高い場合、その傾向が著しい。刺を一本にして、その長さを変化する場合、第9-16図に示す如くであつて、本数の変化と同様の関係がある。前章と同様、その接地抵抗の逆数をとれば第9-17図の如く、印加電圧をパラメータとして平行な直線群となる。

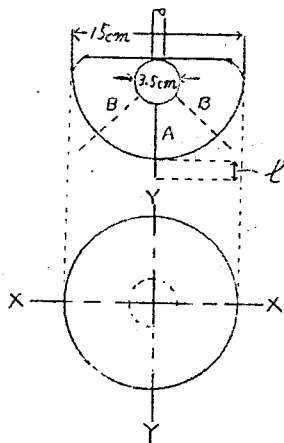
即ち
$$\frac{1}{R_{cl}} = \frac{1}{R_{co}} + k_c \cdot l \quad (9-4)$$

但し R_{cl} : 有刺コンクリート電極の接地抵抗

R_{co} : 無刺

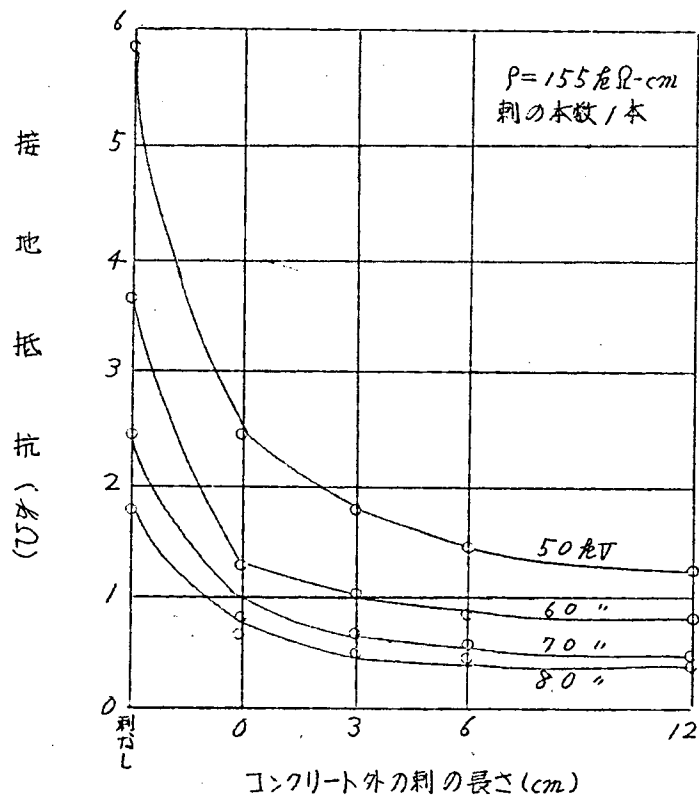
k_c : 定数

l : 刺の長さ



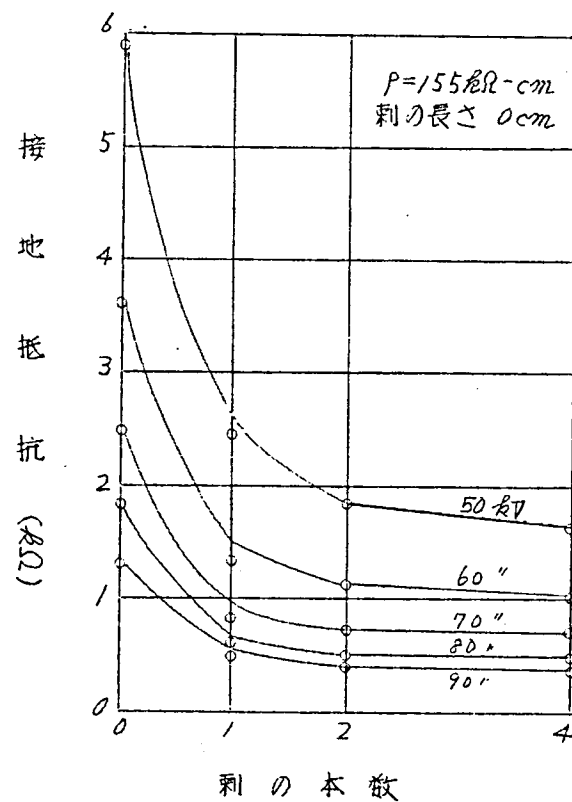
第9-14図

刺の本数	位置
1	A
2	B(X-Xのみ)
4	B(X-X, Y-Y)



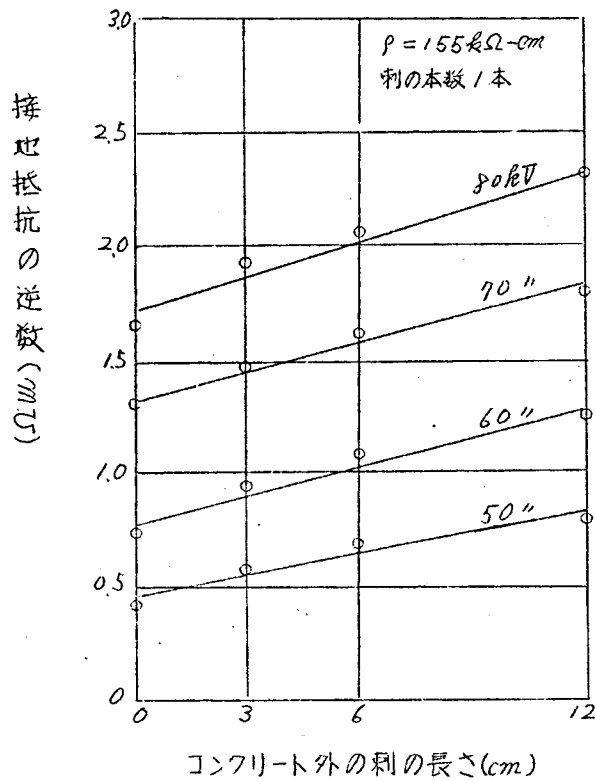
第9-16図 有筋コンクリート電極の接地抵抗

(其の二)



第9-15図 有筋コンクリート電極の接地抵抗

(其の一)



第9-17図 有利コンクリート電極の接地抵抗(其の三)

§7 コンクリートの機械的強度

a. 添加物とコンクリートの機械的強度

添加物によるコンクリートの機械的強度の変化を調べるため、規定に従い、直径15cm、高さ30cmの円筒形のコンクリートブロックを成形し、これを2週間又は4週間水中養生し、アムスラー圧縮試験機により圧縮強度を測定した結果は、第9-11表に示す如くであって、添加物により大きい差異は無いということができる。

第 9-11 表 コンクリートの圧縮強度 (kg/cm^2)

(イ) 材令 1 週間 水中養生 5 日間

添加物 \ x(%)	0	0.5	1.0	2.5	5.0	10.0
木炭粉	154	170	158	159	157	168
酸化鉄粉	—	158	181	179	183	178
銅粉	—	156	158	146	154	156
チタン酸バリウム粉	—	135	166	174	163	162

(ロ) 材令 4 週間 水中養生 26 日間

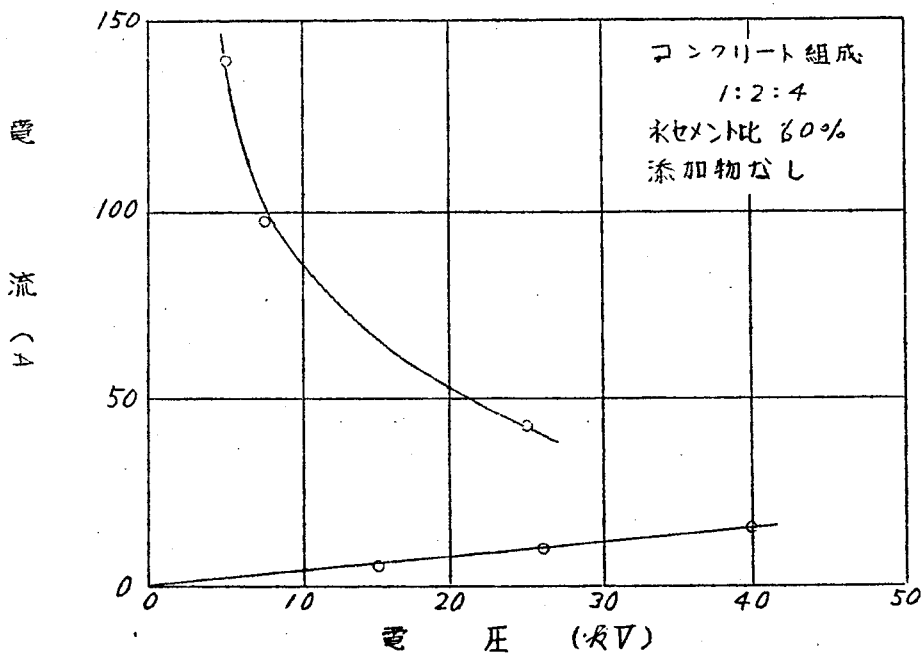
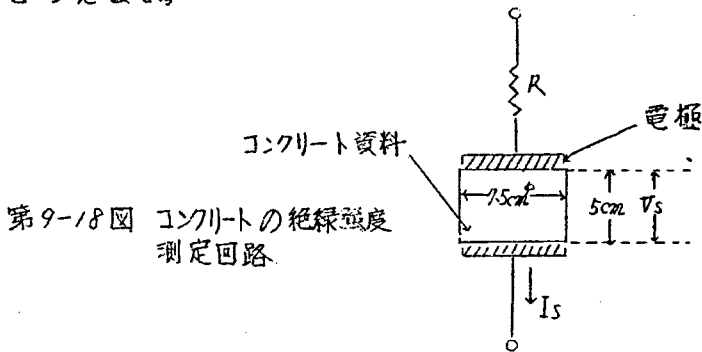
添加物 \ x(%)	0	0.5	1.0	2.5	5.0	10.0
木炭粉	250	272	280	267	223	239
酸化鉄粉	—	226	240	221	226	227
銅粉	—	236	231	252	258	245
チタン酸バリウム粉	—	237	236	242	253	243
黒鉛	—	270	271	275	277	276
添加物 \ x(%)	0	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0
食塩	248	232	235	221	222	201

b. 電氣的破壊後のコンクリートの機械的強度

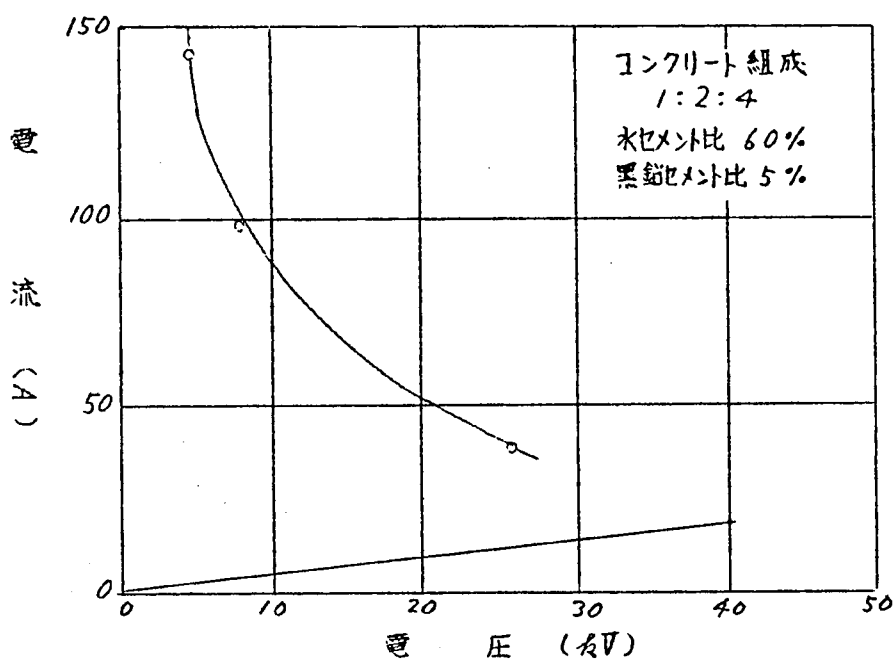
高さ 5cm. 直径 7.5cm の円坪状のコンクリートブロックの両端を円板電極とはさみ、第 9-18 図に示す如く、充分程度の水抵抗をこれと直列に入れ、これに電圧を印加した際の電流よりコンクリートブロックのみの電圧降、電流 I_s を計算して第 9-12 表及び第 9-19 ~ 27 図を得る。資料としては黒鉛及び食塩を添加物として含せコンクリートを使用した。これらの特性を見るに、始め電圧上昇と共に電流値は直線的に増加し、コンクリートが電氣的に破壊を起す如き電圧に達すると、電流は急激に

増加する。

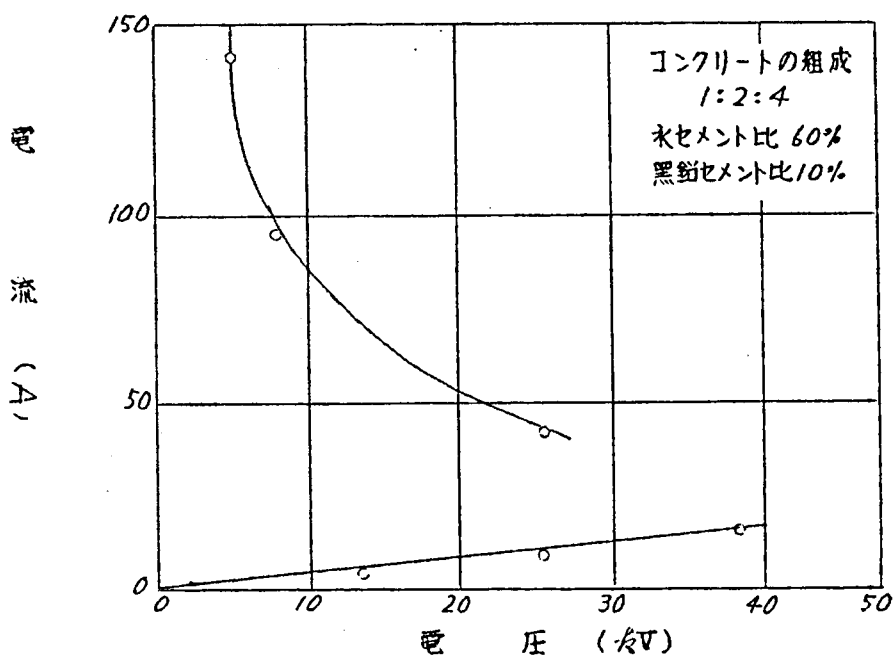
かくの如く電氣的破壊を生じた後のコンクリート資料の機械的強度を
 アムスラー圧縮試験機により測定して第9-73表を得た。これより、
 電氣的に破壊しても機械的強度には殆んど影響はないものといふことが
 出来る。その破壊の程度は視察によれば、電氣的絶縁破壊と共に資料ブ
 ロックの縁は欠けて、また試料の中央に直径5mm程度の小孔があく。
 また表面に於ては3~5cmの裂傷を認めるが、これらは何れも圧縮強度
 に影響を与えない。



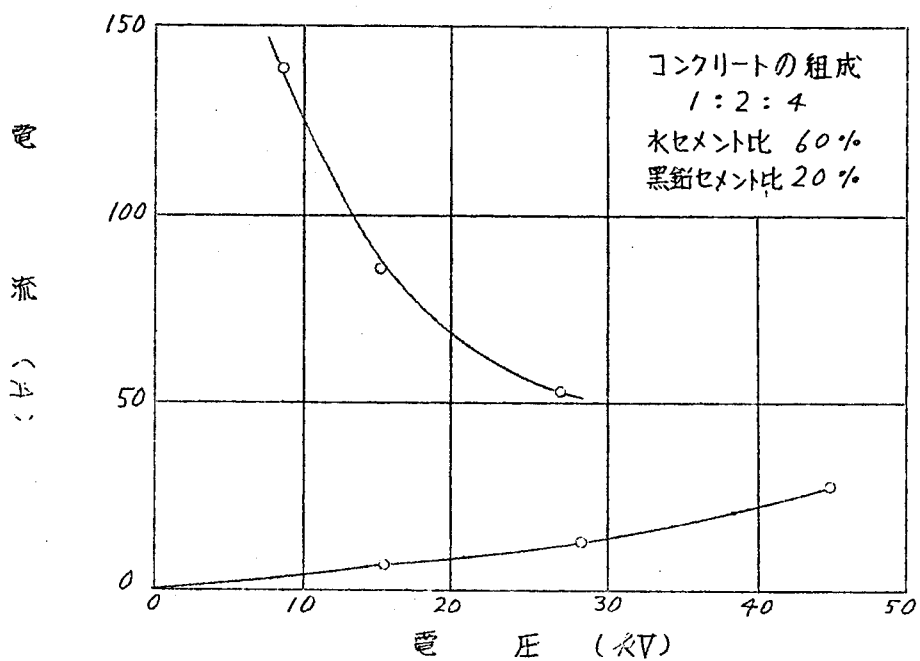
第9-19図 コンクリートの電圧・電流特性 (其の一)



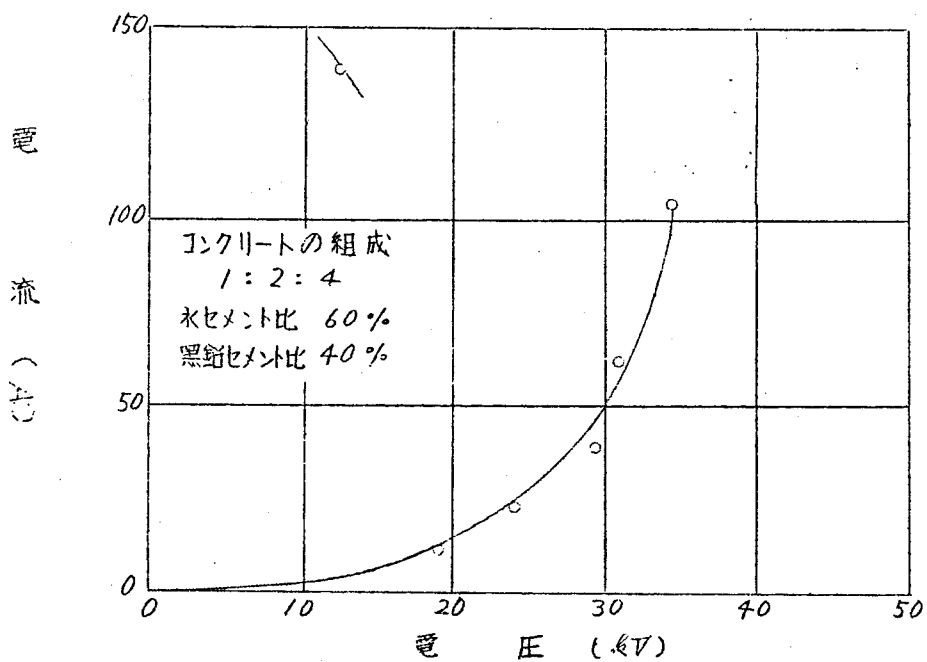
第9-20図 コンクリートの電圧・電流特性 (其の二)



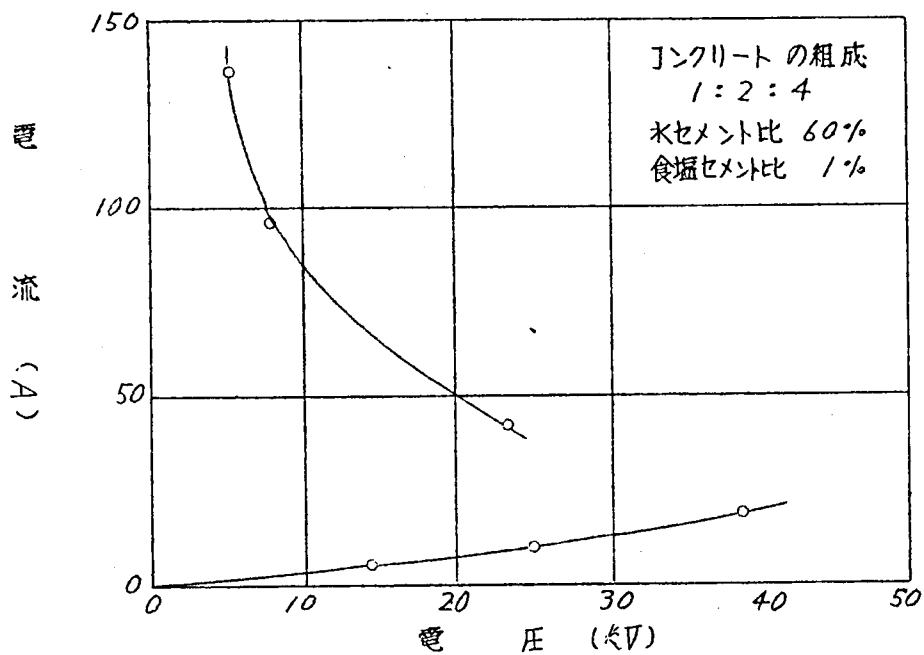
第9-21図 コンクリートの電圧・電流特性 (其の三)



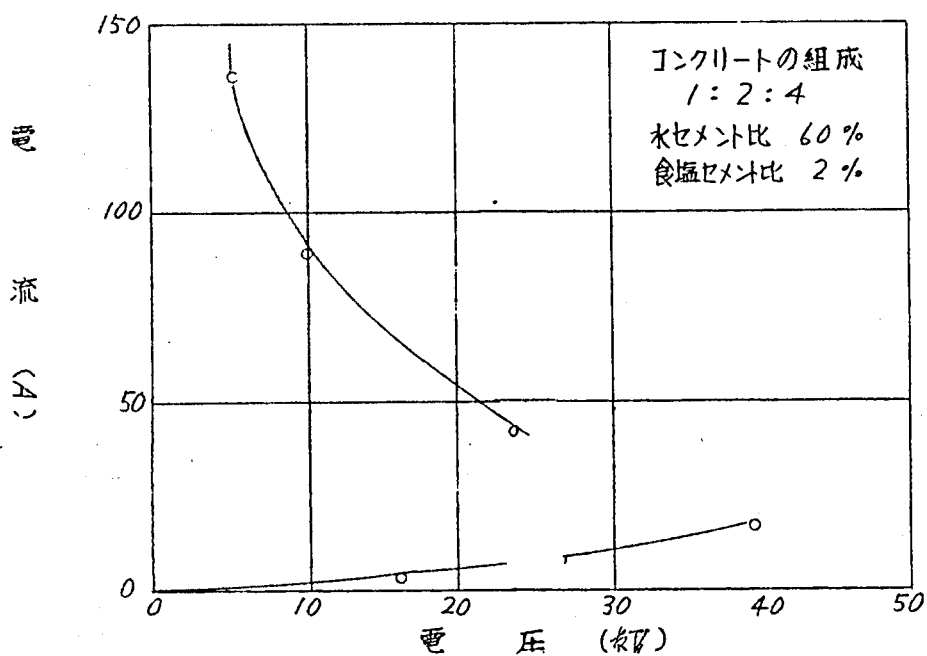
第9-22図 コンクリートの電圧・電流特性 (其の四)



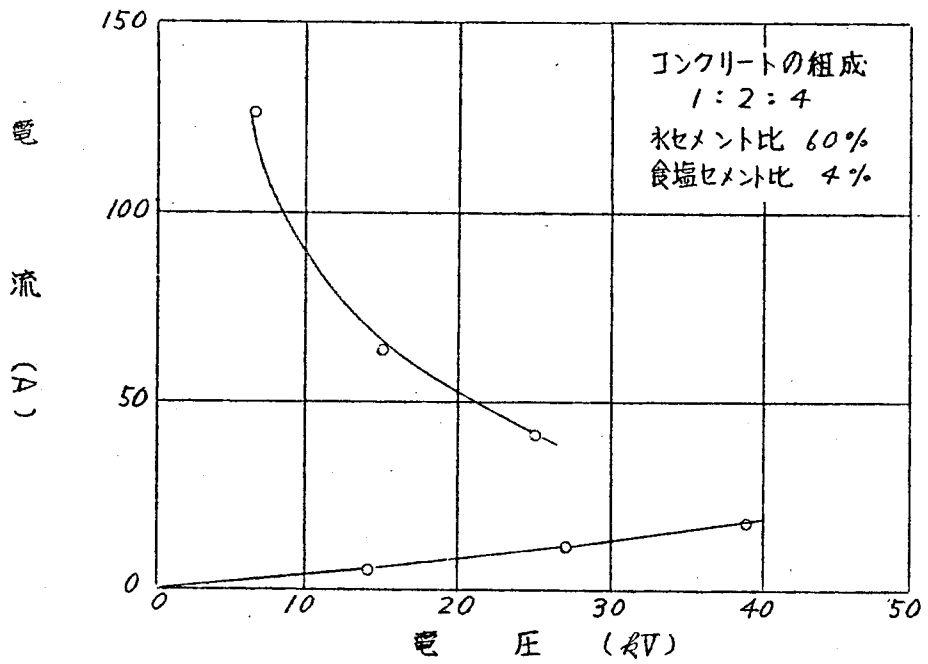
第9-23図 コンクリートの電圧・電流特性 (其の五)



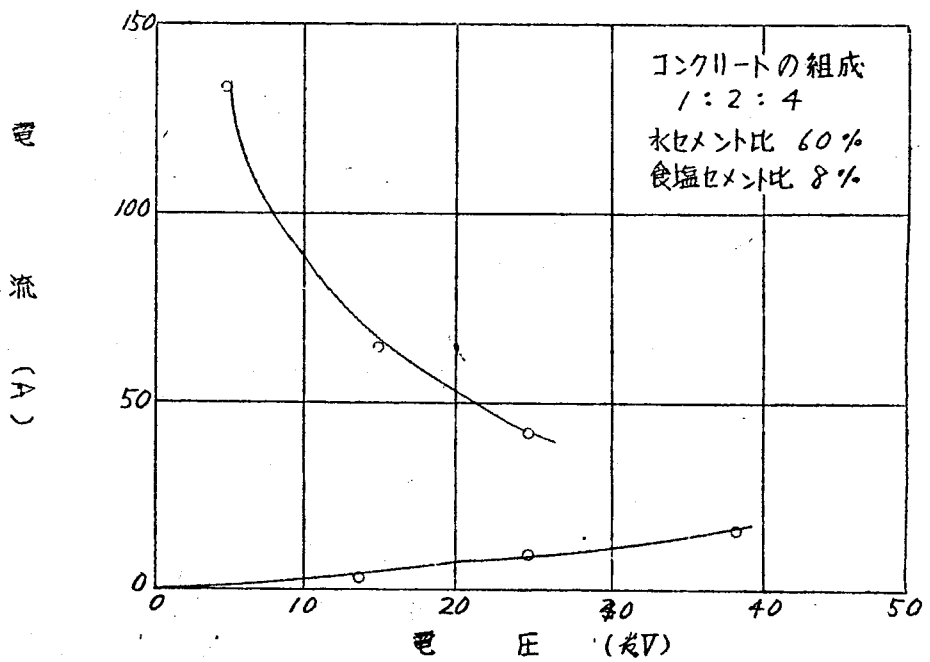
第9-24図 コンクリートの電圧・電流特性(其の六)



第9-25図 コンクリートの電圧・電流特性(其の七)



第9-26図 コンクリートの電圧・電流特性 (其の八)



第9-27図 コンクリートの電圧・電流特性 (其の九)

第9-12表 コンクリートの電圧・電流特性

a. 黒鉛含有の場合 (材令4週間)

(1) 0%

電 圧 (V)	15.3	27.2	40.1	25.0	7.8	5.1
電 流 (A)	5.2	10.1	17.2	43.1	99.3	140.0

(2) 5%

電 圧 (V)	15.4	28.5	39.3	25.4	7.8	4.9
電 流 (A)	5.3	11.9	17.9	40.9	97.3	144.3

(3) 10%

電 圧 (V)	13.7	25.5	38.5	25.5	8.2	5.2
電 流 (A)	4.9	9.3	16.2	42.3	94.9	141.2

(4) 20%

電 圧 (V)	15.4	28.4	45.1	27.2	15.3	8.8
電 流 (A)	6.9	12.8	27.2	53.1	85.2	139.1

(5) 40%

電 圧 (V)	19.6	23.8	29.4	30.9	34.8	12.6
電 流 (A)	13.9	24.0	40.0	62.1	103.9	140.0

b. 食塩含有の場合 (材令4週向)

(1) 1%

電 圧 (kV)	14.4	25.2	39.0	23.6	8.0	5.2
電 流 (A)	4.9	10.9	18.1	41.2	96.1	136.1

(2) 2%

電 圧 (kV)	15.9	26.5	39.3	23.6	10.0	5.2
電 流 (A)	4.3	4.9	17.9	44.0	91.1	136.1

(3) 4%

電 圧 (kV)	14.2	27.2	38.8	25.1	15.1	6.3
電 流 (A)	5.9	11.9	18.0	41.9	64.8	127.6

(4) 8%

電 圧 (kV)	14.1	25.0	38.6	25.0	15.0	4.4
電 流 (A)	4.8	10.7	16.9	43.1	66.7	136.1

第9-13表 コンクリートの電圧電流特性及び圧縮強度

a. 食塩含有の場合（材令4週間）

(1) 0%

電 圧 (V)	0	13.5	24.3	34.9	24.5	18.5	25.6	4.3
電 流 (A)	0	4.5	10.5	15.5	36.6	51.5	73.2	85.5
圧縮強度 (kg/cm^2)	605	415	415	415	491	535	496	512

(2) 1%

電 圧 (V)	0	17.3	31.5	49.0	33.2	43.6	44.5
電 流 (A)	0	7.5	16.0	27.0	30.2	36.0	46.4
圧縮強度 (kg/cm^2)	442	468	468	468	429	521	493

(3) 2%

電 圧 (V)	0	28.3	34.5	43.0	18.5	24.8	9.3
電 流 (A)	0	11.7	15.8	35.4	39.6	70.9	92.8
圧縮強度 (kg/cm^2)	446	405	411	447	501	376	420

(4) 4%

電 圧 (V)	0	24.7	31.0	40.6	12.9	5.0
電 流 (A)	0	10.7	18.0	23.6	40.3	91.0
圧縮強度 (kg/cm^2)	468	402	379	474	481	433

(5) 8%

電 圧 (V)	0	25.0	32.5	15.3	16.2	3.0
電 流 (A)	0	10.0	17.5	41.4	64.7	107.3
圧縮強度 (kg/cm^2)	421	405	392	322	310	319

6. 黒鉛含有の場合 (材令6週間)

(1) 5%

電 圧(V)	0	17.8	29.2	34.5	26.1	7.4	5.0
電 流(A)	0	6.1	11.4	17.5	43.5	9.9	17.8
圧縮強度(kg/cm^2)	555	—	—	440.	—	—	442

(2) 10%

電 圧(V)	0	27.8	37.4	25.6	8.2	5.5	
電 流(A)	0	12.1	17.0	42.0	96.4	17.6	
圧縮強度(kg/cm^2)	320	—	—	400	—	382	

(3) 20%

電 圧(V)	0	17.6	26.7	35.8	45.0	15.8	8.5
電 流(A)	0	8.4	13.5	18.1	27.1	87.9	16.0
圧縮強度(kg/cm^2)	413	—	450	—	—	—	491

(4) 40%

電 圧(V)	0	19.7	23.5	29.7	30.8	35.3	11.3
電 流(A)	0	16.7	23.5	38.6	63.5	106	17.6
圧縮強度(kg/cm^2)	501	—	—	—	530	—	499

第 2 部 の 総 括

- (1) 球状又は円坪状の有刺及び無刺接地電極に衝垂電圧を印加し、埋設フィルムにより土中ストリーマを観察した結果
 - (a) 電圧が低いときは、兩者とも土中ストリーマは発生しない。
 - (b) 電圧が充分高ければ兩者とも長大なストリーマが発生し、接地抵抗の低減効果に差異はない。
 - (c) 電圧が変る範囲内に於ては有刺電極のみに土中ストリーマが発生し、刺の効果が顕著となる。
 - (d) 刺の長さを増加すれば、刺の効果が現われる電圧範囲は大きくなる。
- (2) 有刺電極の接地抵抗を測定し
 - (a) 刺の長さが増加すれば、低減効果は早く現われ、且つ大となり、その関係は、式(7-3)にて示される。
 - (b) 刺の効果は、接地電極の大きさ及び形状により種々変化するが、式の定数を変化することにより式(7-3)を適用することが出来る。
 - (c) 土の比抵抗が低い程、刺の効果は増大する。
 - (d) 印加電圧の波頭長が短い程、また波尾長が長い程、刺の効果は増大する。
- (3) 碗状の中向電極により、土中ストリーマの進展速度を測定すれば、有刺電極の場合は無刺に較べ、約2倍である。
- (4) 接地電極の周辺に木炭粉を配置することにより、接地抵抗の低減効果は一般に増大する。
- (5) コンクリートに各種の添加物を混入することにより、衝垂電圧に対する導電性を増加することが出来る。但し、混入率の如何によつては、却つて増加することもある。添加物としては黒鉛が最も有利で、機械的強度を変化しない範囲で、その抵抗は50%程度に低下する。
- (6) コンクリート製の接地電極に衝垂電圧を印加すれば、電圧の立上りより2~3 μ sの附近で、電流波形に顕著的な増加を生ずる。埋設フ

イルAにより観察すれば、これはコンクリート中を貫通したストリーマが土中に突入する際のものであって、特にコンクリートが添加物を含め場合に著しい。

(7) 電気的破壊後のコンクリートの機械的強度は変化しない。

第3部 埋設地線上の進行波

内 容 梗 概

前篇に記した接地抵抗は、全てこれが集中定数と見做される如き接地電極に対するものであるが、これらの実験結果を考慮に入れ、鉄塔や、埋設地線等を分布定数回路として計算し、進行波の立場より接地抵抗を取り扱うこととする。

第10章 無刺埋設地線の過渡抵抗

§1 概 説

埋設地線上の低電圧の進行波は土中に於いて土の電氣的破壊を伴うことなく伝播するから、その変歪、減衰等は、前篇式(1-5)の定数をそのまま使用して計算出来、すでに諸氏により算出されているが、こゝでは鉄塔の接地に現われる条件によりこれらを計算する。

§2 埋設地線の分布定数

打込棒の如く短い接地電極では、衝電電圧に対し、これを集中抵抗と見做し得るが、埋設地線の如く、相当の長さを有するものに対しては、これを分布定数回路として取扱うのが妥当であつて、次式にて表わされる。^{35), 36)}

$$R = 0$$

$$G = \frac{\pi}{\rho} \left(\ln \frac{2\ell}{a} - 1 \right)^{-1}$$

$$L = \frac{V}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{a} - 1 \right)$$

$$C = \pi (\epsilon + \epsilon_0) \left(\ln \frac{2\ell}{a} - 1 \right)^{-1} \quad (10-1)$$

但し R, G, L, C ; 埋設地線の単位長当りの抵抗, 漏洩コンダクタンス, インダクタンス及びキャパタンス

V ; 大地の導磁率

ϵ ; 大地の比誘電率

ϵ_0 ; 空気の "

ρ ; 大地の固有抵抗

ℓ ; 導体の長さ

a ; 導体の半径

従って

$$\Sigma = \sqrt{L_p / (G + C_p)}$$

$$\gamma = \sqrt{L_p (G + C_p)} \quad (10-2)$$

但し Σ ; 埋設地線の波動インピーダンス
 γ ; " の伝播定数

§ 3. 1本の打込棒と埋設地線とを併用する塔脚の電位

塔脚より x の距離にある地線上の点の電流電圧は、公知の如く、

$$\left. \begin{aligned} e &= e_a \cosh \gamma x - Z i_a \sinh \gamma x \\ i &= \frac{e_a}{Z} \sinh \gamma x + i_a \cosh \gamma x \end{aligned} \right\} \quad (10-3)$$

但し e_a, i_a : 塔脚地線の埋設地線上の電圧, 電流

γ : 伝播定数

Z : 波動インピーダンス

第10-1図の点Eを解放端とし、塔却に I_{or} なる強制電流が印加されたとすれば、打込棒を考慮して

$$e_a = \frac{I_{or}}{k} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left(\frac{k'}{k} \right)^{n-1} + \left(-\frac{k'}{k} \right)^n \right\} \varepsilon^{-2n\tau\ell} \right]$$

$$n \frac{2\ell}{g} < t < (n+1) \frac{2\ell}{g} \quad (10-4)$$

但し n : 終端Eに於ける反射回数

$$k = \left(\frac{1}{R_B} + \frac{1}{Z} \right) \quad k' = \frac{1}{Z} - \frac{1}{R}$$

R_B : 打込棒の接地抵抗

g : 伝播速度

$$E_a(t) = \mathcal{L}^{-1} e_a(p) = E_{a0}(t) + \sum_{n=1}^{\infty} E_{an}(t) \quad (10-5a)$$

但し $E_{a0}(t)$: 終端に於ける反射波を含まない電位

$E_{an}(t)$: 終端に於ける n 回目の反射波による電位

$$E_{a0} = I_{or} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{\varepsilon^{-\sigma t}}{1+\eta} \left[I_0(\sigma t) + (1-k) \sum_{v=1}^{\infty} (-k)^{v-1} I_0(\sigma t) \right] \quad (10-5b)$$

$$\text{但し} \quad k = \frac{1-\eta}{1+\eta} \quad \eta = \frac{1}{R_B} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \sigma = \frac{G}{2C}$$

$$E_{an} = 2 I_{or} \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{\varepsilon^{-\sigma t}}{(1+\eta)^2} \sum_{v=0}^{\infty} a_{nv} \left(\frac{t - 2n\ell/g}{t + 2n\ell/g} \right)^{v/2} \cdot (-1)^v \cdot I_0 \left(\sigma \sqrt{t^2 - \left(\frac{2n\ell}{g} \right)^2} \right) \cdot$$

$$H \left(t - \frac{2n\ell}{g} \right) \quad (10-5c)$$

$$\text{但し} \quad g = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

a_{nv} : k の函数

a_{nv} の例

$$a_{10} = 1$$

$$a_{11} = 2(l-1)$$

$$a_{12} = 3l^2 - 4l + 1$$

$$a_{13} = 4l^3 - 6l^2 + 2l$$

$$a_{14} = 5l^4 - 8l^3 + 3l^2$$

$$a_{20} = l$$

$$a_{21} = 3l^2 - 2l - 1$$

$$a_{22} = 6l^3 - 6l^2 - 2l + 2$$

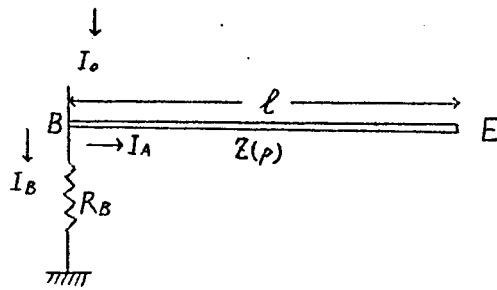
$$a_{23} = 10l^4 - 12l^3 - 3l^2 + 6l - 1$$

$$a_{24} = 15l^5 - 20l^4 - 4l^3 + 12l^2 - 3l$$

式(10-5c)により第10-1表に示す条件下に、始端に打込棒を有する埋設地線の、始端より見た過渡抵抗につき計算すれば、第10-3(a)及び(b)図の如くである。

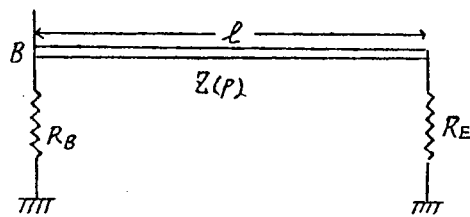
第10-1表 埋設地線の条件

条件 \ 項目	$R(\Omega)$	E	$P(10^3 \Omega\text{-cm})$	$l(m)$	$a(cm)$
a	100	20	100	30	0.95
b	"	80	"	"	"



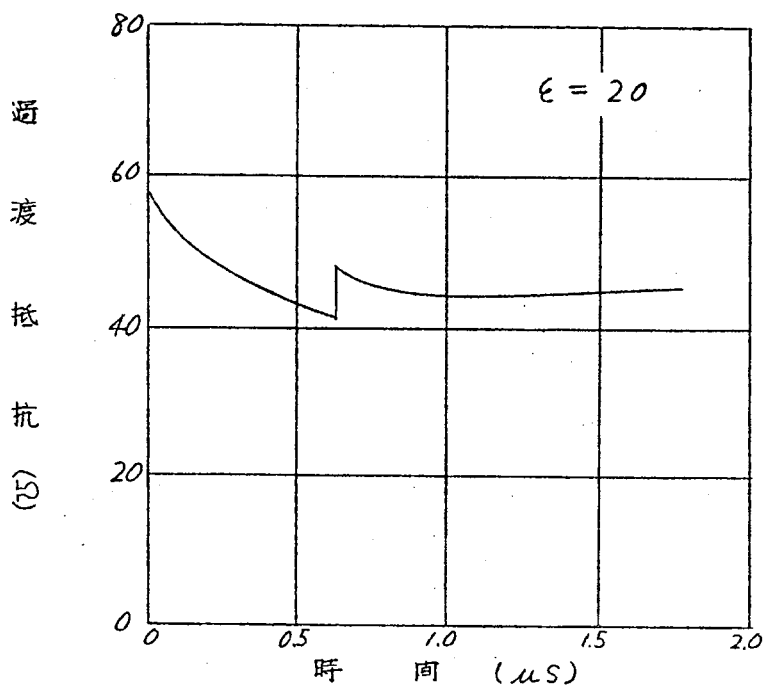
第 10-1 図

打込棒と埋設地線との配置
(其の一)

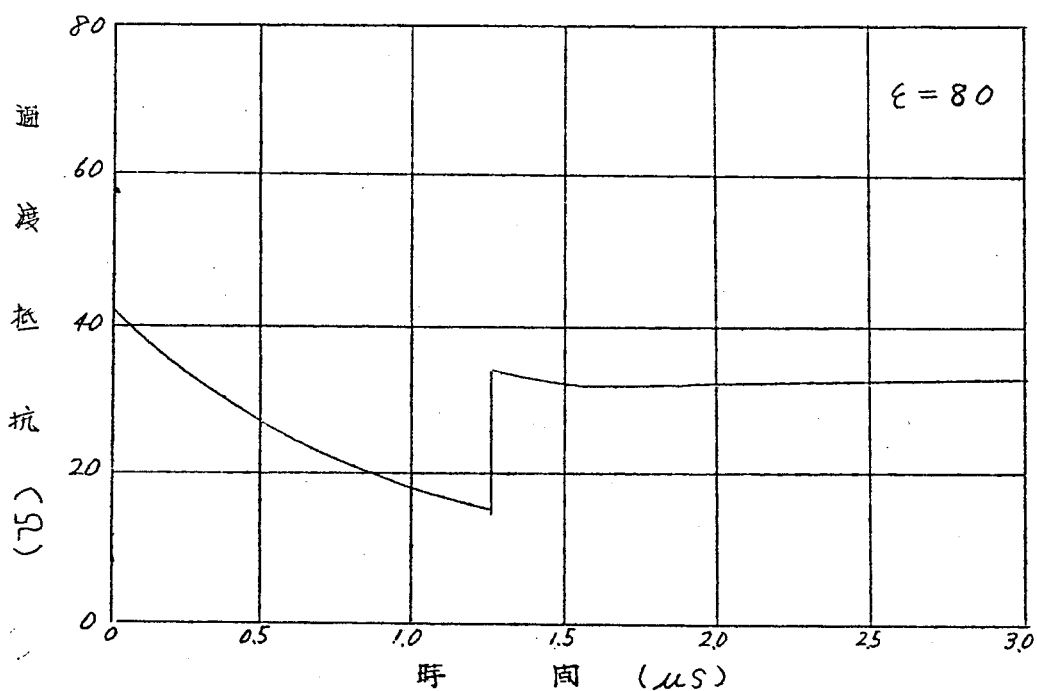


第 10-2 図

打込棒と埋設地線との配置
(其の二)



第10-3図(a) 埋設地線の遷渡抵抗



第10-3図(b) 埋設地線の遷渡抵抗

§4 2本の打込棒を埋設地線の両端に有する塔脚の電位

第10-2図に示す如き打込棒と地線との配置に於いて、前項と同じく塔脚Bに単位函数状の強制電流 I_{0r} が印加されたとすれば、この時の電位 $E'a$ は前項の記号に従い

$$E'a(t) = E'a_0(t) + \sum_{n=1}^{\infty} E'an(t) \quad (10-6a)$$

$$E'a_0 = E'a_0 \quad (10-6b)$$

$$E'an = 2I_{0r} \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{\xi^{-\sigma t}}{(1+\eta)^2} \sum_{p=1}^{\infty} a'_{np} \left(\frac{t - \frac{2n\ell}{g}}{t + \frac{2n\ell}{g}} \right)^{1/2} (-1)^p I_0 \left(\sigma \sqrt{t^2 - \left(\frac{2n\ell}{g} \right)^2} \right) \quad (10-6c)$$

但し a'_{np} : η の函数

第11章 有刺埋設地線の過渡抵抗

§ 1 有刺埋設地線を有する塔脚の電位

第10-2図に於いて、打込棒を更に増加した場合を考えれば、第10-4(a)図に示す如き有刺埋設地線となる。この時の進行波特性を計算するのに、始め、第1-4図(b)に示す如き π 型回路の単素子を考え、これが n 個だけ連なったものと考えれば、単素子に於いては

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{RQ}{2} & \\ (R + \frac{Q}{4}) \frac{Q^2}{4} & 1 + \frac{RQ}{2} \end{bmatrix} \quad (10-7a)$$

但し a, b, c 及び d は π 型回路の4端子網定数
 n 個の従続接続の際の4端子網定数は³⁰⁾

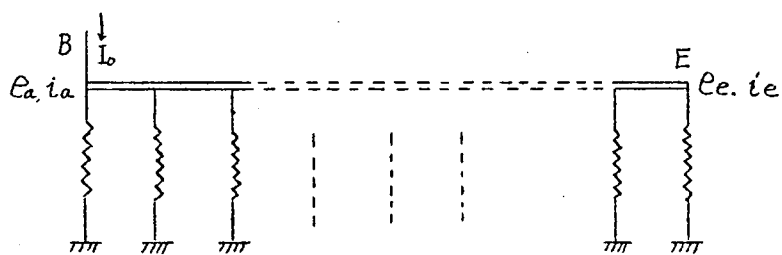
$$\begin{bmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^n \quad (10-7b)$$

と し、Sylvester の展開定理により

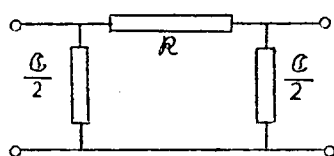
$$\left. \begin{aligned} a_n &= \cosh ng \\ b_n &= Z_i \sinh ng \\ c_n &= \frac{1}{Z} \sinh ng \\ d_n &= a_n \end{aligned} \right\} \quad (10-8)$$

$$\text{但し } Z_i = \sqrt{\frac{R}{Q}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4} RQ}} \quad : \text{ 影像イムピーダンス}$$

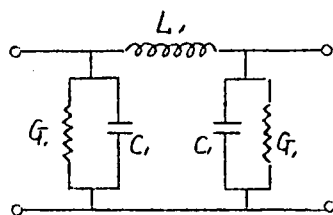
$$\cosh g = a$$



(a)



(b)



(c)

第 10-4 図 有刺埋設地線及び
その等価回路

a. 映像インピーダンスを負荷とする場合

この時、反射がないから、強制電流 I_{or} に対し、塔脚電位は

$$e_{ao}(p) = Z_i(p) \cdot I_{or}$$

第10-4図に示すπ型回路の映像インピーダンスは R 及び θ を集中インピーダンスと見做して第1-4(C)図の如き等価回路にて表わせば $R = pL$, $\theta = G + pC$ となるから式(10-8)より

$$Z_i(p) = W_1 \frac{p}{\sqrt{(p+\sigma_1)^2 - \sigma_1^2} \sqrt{1 + \frac{1}{4W_1^2} \{(p+\sigma_1)^2 - \sigma_1^2\}}} \quad (10-9)$$

$$\text{但し } W_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \quad \sigma_1 = \frac{C_1}{2G_1}, \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

$$E_{ao}(t) = \mathcal{L}^{-1} e_{ao}(p) = W_1 I_{or} \Phi_o(\tau)$$

$$\text{但し } \tau = 2\omega t$$

$$\Phi_o(\tau) = \int_0^\tau J_0(\xi) J_0\left(j \frac{\sigma_1}{2W_1} \sqrt{\tau^2 - \xi^2}\right) d\xi$$

b. 終端開放の場合

式(1-5a)より

$$\left. \begin{aligned} e_a &= a_n e_e + b_n i_e \\ i_a &= c_n e_e + a_n i_e \end{aligned} \right\} \quad (10-10)$$

但し e_a , i_a , e_e , i_e : 第10-4(a)図に示す。
この場合、 $i_a = I_{or}$, $i_e = 0$ であるから

$$e_a = \frac{a_n}{c_n} \cdot I_{or}$$

式(10-8)より

$$\frac{a_n}{c_n} = \frac{\cosh \cdot n\gamma}{Z_i \sinh \cdot n\gamma} = Z_i \left\{ 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} e^{-2m\gamma} \right\} \quad (10-11)$$

また

$$e_a = \sum_{m=0}^{\infty} e_{am}$$

と置けば

$$e_{a0} = I_{0T} \cdot Z_i \quad (10-12)$$

即ち、反射波が来るまでは、式前項(a)と同一となる。
次に

$$\begin{aligned} e_{a1} &= 2Z_i \cdot e^{-2\gamma} \cdot i_a \\ &= 2W_i \cdot \frac{P}{\sqrt{(P+\sigma_1)^2 - \sigma_1^2}} \cdot \frac{I_{0T}}{\sqrt{1 + \frac{1}{4W^2} \{(P+\sigma_1)^2 - \sigma_1^2\}}} \\ &\quad \left[\sqrt{1 + \frac{1}{4W^2} \{(P+\sigma_1)^2 - \sigma_1^2\}} - \sqrt{\frac{1}{4W^2} \{(P-\sigma_1)^2 - \sigma_1^2\}} \right]^{4n} \end{aligned}$$

$$\therefore E_{a1}(\tau) = \mathcal{L}^{-1} e_{a1}(\rho) = 2W_i I_{0T} \mathcal{E}^{-\sigma_1 \tau} \Phi(\tau) \quad (10-13)$$

但し $\tau = 2\omega t$

$$\Phi_1(\tau) = \int_0^{\tau} J_{4n}(\xi) \cdot J_0 \left(j \frac{\sigma_1}{2\omega} \sqrt{\tau^2 - \xi^2} \right) d\xi$$

同様にして

$$e_{am} = 2W_i I_{0T} \frac{P}{\sqrt{(P+\sigma_1)^2 - \sigma_1^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4W^2} \{(P+\sigma_1)^2 - \sigma_1^2\}}} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{1}{4W^2} \{(P+\sigma_1)^2 - \sigma_1^2\}} - \sqrt{\frac{1}{4W^2} \{(P+\sigma_1)^2 - \sigma_1^2\}} \right]^{4m\gamma}$$

$$E_{am}(\tau) = 2W_i I_{0T} \mathcal{E}^{-\sigma_1 \tau} \Phi_m(\tau) \quad (10-14)$$

$$\text{但し } \Phi_m(\tau) = \int_0^{\tau} J_{4mm}(\xi) \cdot J_0 \left(j \frac{\sigma_1}{2\omega} \sqrt{\tau^2 - \xi^2} \right) d\xi$$

故に

$$E_a(\tau) = \sum_{m=0}^{\infty} E_{am}(\tau) = W I_{0T} (\Phi_0 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m) \quad (10-15)$$

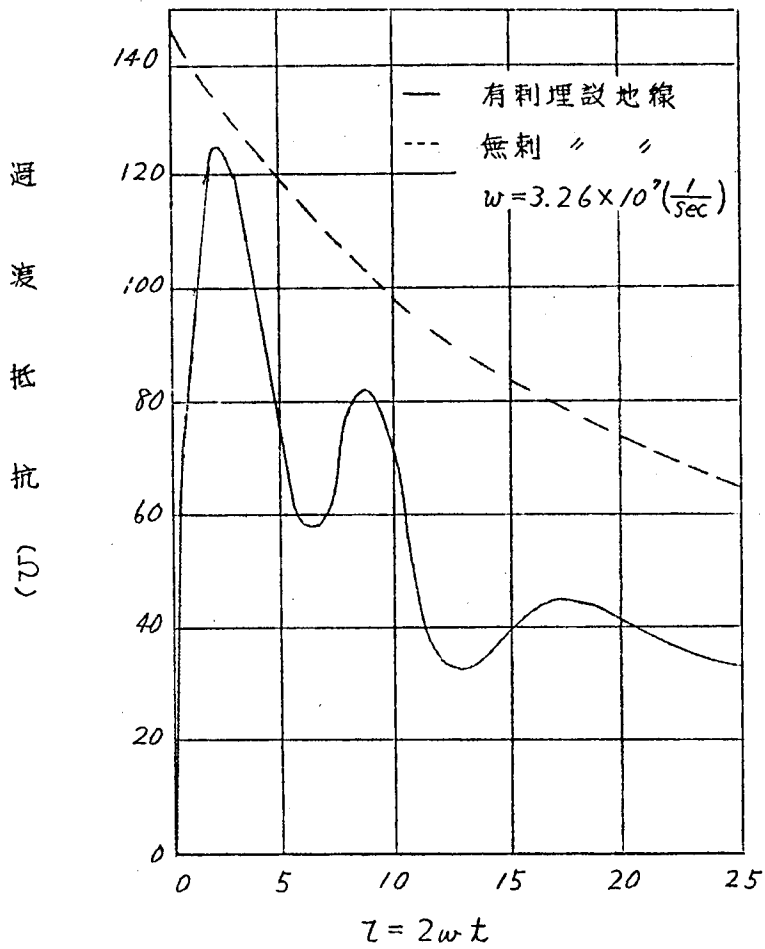
C. 計 算 結 果

式(10-15)により第10-2表に示す条件下に計算すれば第10-5(a), (b)図の如くであり、且つ利を割受した場合を併記する。これより明らかな如く、土中ストリーマの発生止さる場合も、利の効果は顕著である。

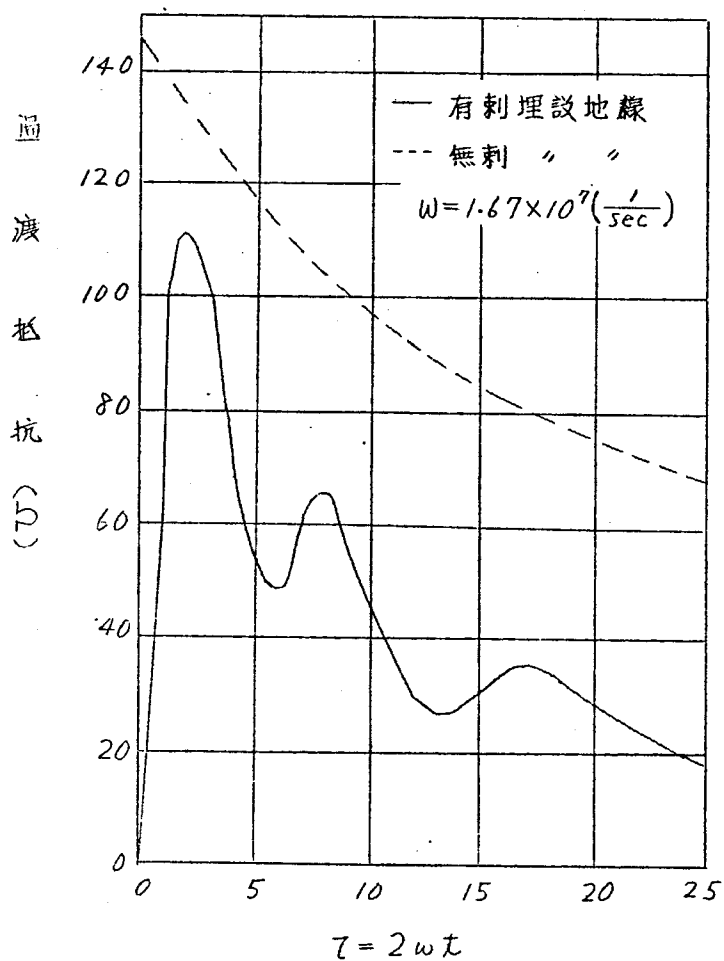
第10-2表 有刺埋設地線の条件

条件 \ 項目	ϵ	$\rho(10^3\Omega\text{-cm})$	$\ell(m)$	$\ell'(m)$	$d(m)$	$a'(cm)$
a	20	100	30	1	2	0.1
b	"	"	"	2	4	"

但し ℓ : 埋設地線の全長
 e : 利の長さ
 d : 利の配置間隔
 a' : 利の直径



第10-5図(a) 始端より見た埋設地線の過渡抵抗
 (刺の長さ1 m, 配置間隔2 m) (共ノー)



第10-5図(b) 始端より見た埋設地線の過渡抵抗

(刺の長さ2m, 配置間隔4m) (其ノ二)

§2. 有刺埋設地線に沿う電位分布

有刺埋設地線に沿って進行する電圧波が減衰する模様の計算する。

地線の始端の電圧電流と、始端より数えて l 番目の刺の分岐点に於ける電圧 e_l 、電流 i_l との関係は

$$\begin{bmatrix} e_l \\ i_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_l & b_l \\ c_l & d_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_0 \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (10-16a)$$

式(10-8)を参照すれば

$$\left. \begin{aligned} a_l &= \cosh l g & b_l &= Z_i \sinh l g \\ c_l &= \frac{1}{Z_i} \sinh l g & d_l &= a_l \end{aligned} \right\} \quad (10-16b)$$

また

$$\begin{bmatrix} a_l & b_l \\ c_l & d_l \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} a_l & -b_l \\ -c_l & d_l \end{bmatrix} \quad (10-16c)$$

A. 影像インピーダンスを負荷とする場合

前節より

$$e_{a0} = I_{0T} \cdot Z_i$$

上式と式(10-15b)より

$$\begin{bmatrix} e_l \\ i_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_l & -b_l \\ -c_l & d_l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{0T} \cdot Z_i \\ I_{0T} \end{bmatrix}$$

$$\therefore e_l = I_{0T} \cdot Z_i \cdot e^{-l g} \quad (10-17)$$

上式より

$$E_l(t) = \mathcal{L}^{-1} e(p) = I_{0T} \cdot W \int_0^t J_0(\xi) I_0(\sqrt{t^2 - \xi^2}) d\xi \quad (10-18)$$

但し、記号は前節と同一とする。

b. 終端開放の場合

式(10-7a)より

$$\begin{bmatrix} e_e \\ i_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_e & -b_e \\ -c_e & d_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{0T} \frac{a_n}{c_n} \\ I_{0T} \end{bmatrix} \quad (10-19a)$$

$$\therefore e_e = I_{0T} \left(\frac{a_n}{c_n} a_e - b_e \right) \quad (10-19b)$$

但し $\frac{a_n}{c_n} = Z_i \frac{\cosh n\beta}{\sinh n\beta}$ (10-8)

$$\therefore e_e = I_{0T} Z_i \frac{e^{(n-e)\beta} + e^{-(n-e)\beta}}{e^{n\beta} - e^{-n\beta}} = I_{0T} Z_i e^{-e\beta} (1 + e^{-2(n-e)\beta}) \sum_{m=0}^{\infty} e^{-2m\beta} \quad (10-20)$$

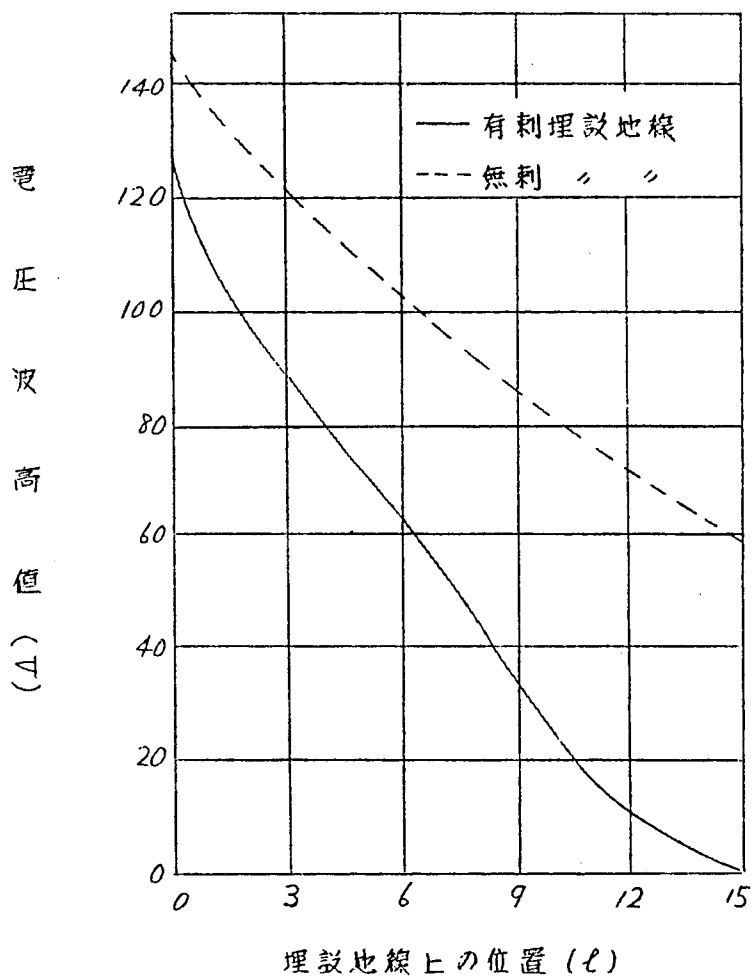
特に $e=0$ (始端) とは前項式(10-10a)と一致し、 $e=n$ (終端) とは

$$e_n = I_{0T} Z_i \sum_{m=0}^{\infty} e^{-n(2m+1)\beta} \quad (10-21)$$

この時 e_n の表函数 $E_n(t)$ は

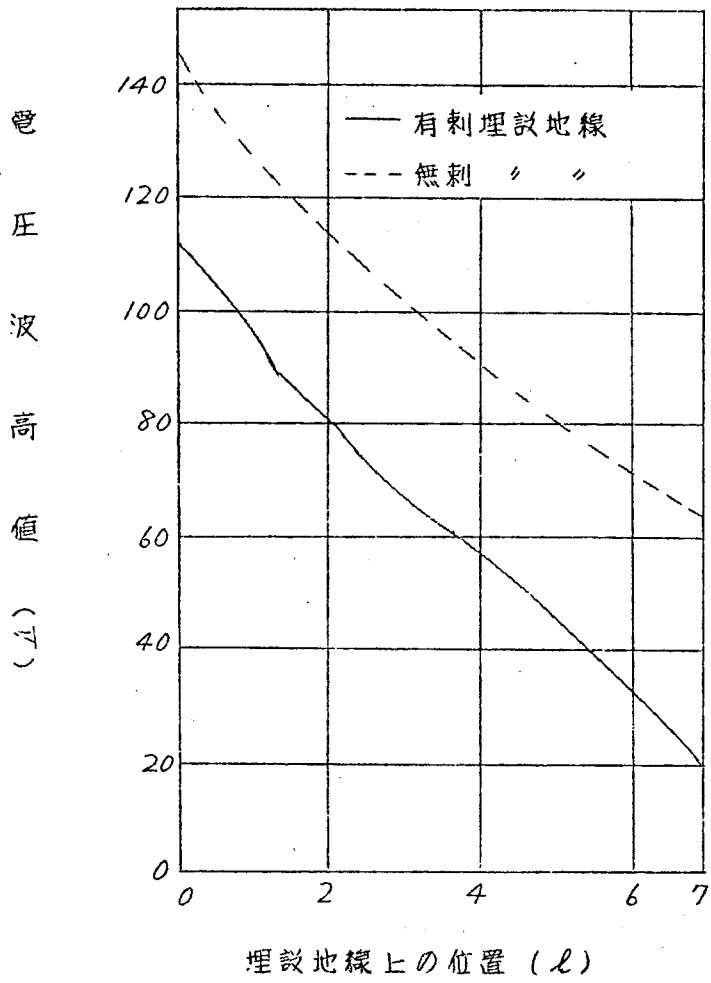
$$E_n(t) = \mathcal{L}^{-1} e_n(p) = I_{0T} \cdot W \cdot e^{-\beta t} \sum_{m=0}^{\infty} \int_0^t J_{2n-(2m+1)}(\xi) \cdot I_0(\beta \sqrt{t^2 - \xi^2}) d\xi \quad (10-22)$$

式(10-18)より、有刺及び無刺埋設地線に対し、1Aの電流がその始端に流入する際の、地線に沿う電圧波高値を計算すれば、第10-6図の如くである。但し条件は第10-2表に示すものと同一とする。



第10-6図(a) 埋設地線に沿う電圧波高値

(条件は第10-5図(a)に同じ)



第10-6図(b) 埋設地線に沿う電圧波高値
(条件は第10-5図(b)に同じ)

§ 3 埋設地線の周辺に土中ストリーマが発生する場合の過渡特性

前節までは、回路素子が線型である場合につき考察したが、これは、 $0.5 \mu s$ 以内の現象である。これに対し、雷電流が流入して土中ストリーマが発生することにより埋設地線の接地抵抗が低減し始めるのは、 $0.5 \mu s$ 以後であり、特に問題となるのは碍子の閃絡特性及び雷電圧波形と関連して、雷電後 $1 \mu s$ の附近である。

即ちこの場合によ、埋設地線の分布定数に、更に、土中ストリーマによる回路素子が附加されることとなり、且つこれらの素子は電流値により多様に変化する。従つて地線の接地抵抗の過渡特性を計算するのは困難であるので、こゝでは、第6章に記せる等価回路により、土中ストリーマを伴う埋設地線の模擬回路を構成し、各部の電位をオシログラフにて読むものとする。

今、地線の始端より I の A が流入するものとし、これが地線全体より一杯に排流されるものとすれば

$$i = I/\rho \quad (10-23)$$

但し i : 地線より 1 m 当り排流される電流 (A/m)

 l : 地線の全長

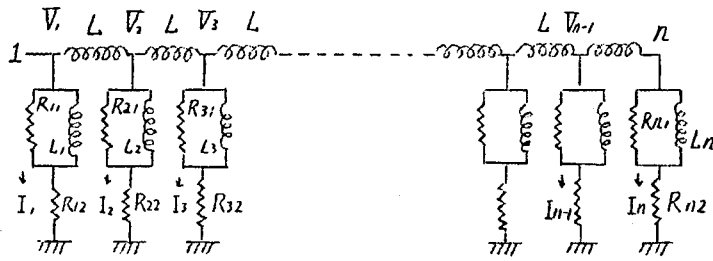
従って、上記の仮定の下では、土中ストリーマを伴う地線の等価回路は、第10-ク図において

$$\begin{aligned} R^{(0)}i_1 &= R_1 & i &= 1 \dots n \\ R^{(0)}i_2 &= R_2 & & \\ L^{(0)}i &= L & & \end{aligned}$$

とある。

但し、 $R^{(0)}_{i1}$, $R^{(0)}_{i2}$, 及び $L^{(0)}_i$ は、実験値⁽²⁾より、第10-3表の如く取るものとする。(但し、同表の γ は時定数である。

次に、地線の始端より矩形波の電流を加えつつ、各点の電流 $i_i (i=1, \dots, n)$ を測定し、この電流値に従い、 $R_{i1}, R_{i2}, L_i, \dots$ を表10-3表により、



第10-7図 埋設地線の等価回路

第10-3表 等価回路の構成素子

I_0 (fA)	1	2	4	6	8	10	20	28	36
R_{i1} (Ω)	335	407	420	458	466	474	489	495	495
R_{i2} (Ω)	165	93	80	42	34	26	11	5	5
L_i (μ H)	96	116	120	132	133	135	140	141	141
T (μ S)	1/3.5	"	"	"	"	"	"	"	"

$R_{i1}^{(1)}$, $R_{i2}^{(2)}$, $L_i^{(1)}$ ($i=1, \dots, n$) に同じ同様の測定を行い、これを m 回繰返すものとする。

即ち、最後に第10-7図の素子は $R_{i1}^{(m)}$, $R_{i2}^{(m)}$, $L_i^{(m)}$ となる。この時、各素子を流れる電流と素子の値が一致すれば各素子の電圧、電流波形は、土中ストリーマを考慮したものである。

本節における計算条件は、第10-2表(a)に準ずる。但し $P=210 \text{ k}\Omega\text{-cm}$, $\ell=10 \text{ m}$ とする。このとき、低電圧に対し埋設地線の特性は

$$G = 0.200 \times 10^{-2} \text{ v/m}$$

$$L = 1.5516 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$C = 0.7533 \times 10^{-10} \text{ F/m}$$

となる。

また、式(10-23)において $I=20 \text{ fA}$, $n=10$ とし、単位函数状($T \leq 0.1 \mu\text{S}$)の衝撃電流を第10-7図に示す模擬回路の始端1に印加した結果、同

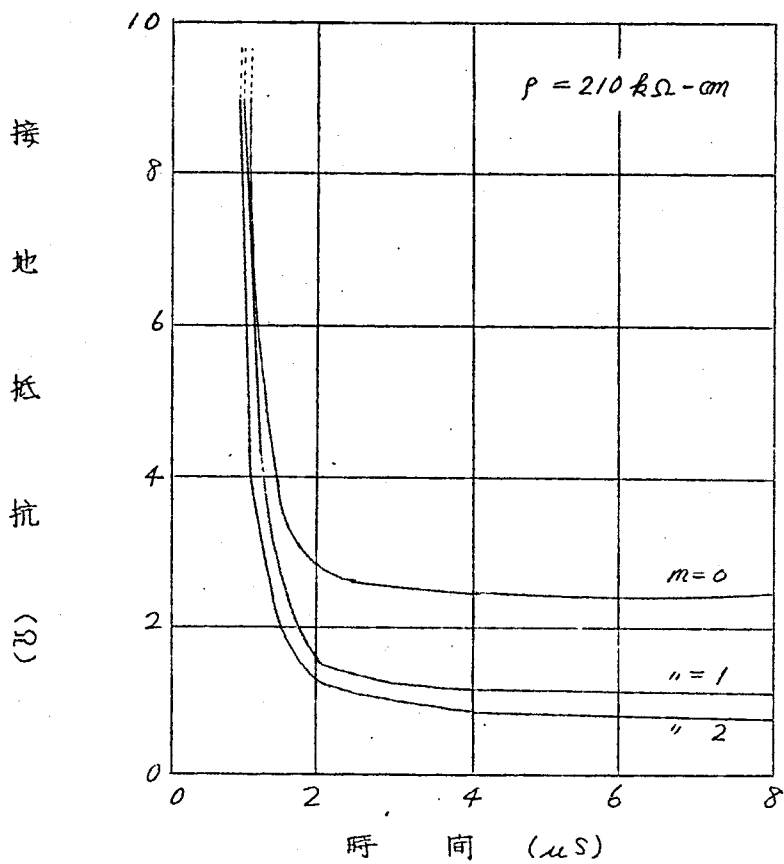
図に示す各点の電流値 $I_i^{(0)}$ を測定すれば第10-4表第1例に示す如くであり、第10-3表に従い、素子の値を訂正、この回路により第10-4表 $I_i^{(1)}$ を得る。同様にして $I_i^{(2)}$ を求む。 $I_i^{(0)}$ と $I_i^{(2)}$ とは、約20%の差にて一致し、従って各素子と電流とは土中ストリーマの発生を考慮せるものと見えられる。

第10-4表 各英の電流値(μA) $t=1\mu S$

i \ 電流	i	$I_i^{(0)}$	$I_i^{(1)}$	$I_i^{(2)}$
1	200	34.5	34.0	42.2
2	"	28.4	29.9	36.0
3	"	23.7	21.2	24.5
4	"	23.7	18.7	16.3
5	"	17.3	18.1	15.0
6	"	17.3	16.4	14.0
7	"	15.7	15.2	13.0
8	"	15.7	15.2	13.0
9	"	13.3	15.6	13.0
10	"	13.3	15.6	13.0
合計	200	200	200	200

この回路を始端より見た接地抵抗 $R^{(m)}$ ($m=0, 1, 2$) は第10-8図の如くである。

これより明らかな如く、土中ストリーマが発生すれば、排流は電流の印加点に集中し、その過渡抵抗は、排流が一杯と見做す場合よりも、低減が速く、且つ大きい。



第10-8図 始端より見た有利埋設
地線の過渡抵抗

(土中ストリーマを考慮せる場合)

第 3 部 の 総 括

- (1) 一端または両端に打込み棒を有する埋設地線の過渡抵抗を、素子が線型の場合につき計算した。
- (2) 有利埋設地線の過渡抵抗及び地線に沿う電位分布につき計算し、これを無輻埋設地線と比較した結果、前者に於ける減衰が特に顕著であることが明らかとなった。
- (3) 分布定数回路と見做されるべき比較的長い埋設地線に対し、土中ストリーマを考慮して模擬回路によりその過渡抵抗を計算した。

結 言 謝 辞

以上の研究結果を要約すれば次の如くである。

- (1) 現今使用されている各種の接地電極の定常接地抵抗につき記すると共に、針金による刺状の電極、及び有刺電極の周辺の電界及び接地抵抗につき計算し、衝激電流に対し、土中ストリーマの発生が容易である根拠を示した。
- (2) 接地抵抗の低減効果の主要因たる土中ストリーマの発生機構並びに様相に關する *Petro-poulos* 氏の理論が、実験結果と必ずしも一致しない理由につき考察した。
- (3) 本実験に使用せる実験装置の概略を記し、特に衝激電圧発生装置の起動用回線の改良、衝激電圧波高値及び波形の調整方法、截断波発生装置の考案、実験室内で接地抵抗を測定するための土の容器の構造、及びこれを使用することの得失を記した。
- (4) 水の破壊電位傾度・水中に於ける火花の遅れ、土の含水率と比抵抗・土の比抵抗及び電極間距離と破壊電位傾度・土中に於ける火花の遅れ等、土の電気的性質を測定した。
- (5) 土中にX線フィルムを埋設して土中ストリーマを直接的に観察し、
 - a. 土中ストリーマの形状、大きさ
 - b. 截断波と併用し、土中ストリーマの進展速度及び形状の変化を印加電圧の波形、土の比抵抗、電極の形状等、各種のパラメータにつき測定し、且つ、土中ストリーマに關する諸氏の実験方法及び結果を参考とし、埋設フィルムによる実験方法を検討した。
- (6) 碗状の中間電極を使用して、土中ストリーマの大きさ、平均進展速度を各種のパラメータにつき測定した。
- (7) 土の比抵抗が電流密度により変化するために現われる接地抵抗の変化を、土と木炭粉との混合物を資料として測定し、土中ストリーマに依らない低減効果を測定した。
- 8) 衝激電流に対する接地抵抗と、簡単な線型回路とをブリッジに組み、両者の平衡を取ることにより、非線型素子である接地抵抗を線型回路

にて近似した。これによれば、印加電圧、電極の大きさ、また有利電極に於いては、その刺の長さが増加すれば、等価回路中のインダクタンスは減少し、接地抵抗の呼定数は減少する。

(9) 有利電極に於いては、無利電極に比較して

a. 電極周辺の電界が強くなり、土中ストリーマの進展が早く且つ大きくなることを埋設フィルムより観察した。

b. 従って衝電流に対する接地抵抗の低減効果は早く、且つ大きく現われることを確認した。

また、刺の効果は、印加電圧の波高値、波形・土の比抵抗・電極の大きさ・刺の長さ及び本数等により多岐に変化するのぞこれを各種の条件下に測定し、実験式にまとめた。

(10) 土中ストリーマの発生し難い赤土に木炭粉を混入し、この際の接地電極周辺の土中ストリーマの発生状況並びに接地抵抗の低減効果を測定した。これによれば木炭粉の混入率と共に始め接地抵抗は却って増加し、その後減少する傾向をみづ。

(11) 鉄塔のコンクリート基礎の接地抵抗を衝電流に対して低減するため、種々の添加物を混入したコンクリートにより鉄塔基礎の電氣的模型を作成して実験した。これにより、その接地抵抗を50%程度に低下することができ、埋設フィルムにより観察すれば、添加物によりコンクリート中にストリーマが発生し易くなり、これが土中にまで大きく延びることが、抵抗低減の原因である。

(12) 鉄塔塔脚に接続した有利及び無利埋設地線上の進行波につき計算を行い、前者に於ける減衰が特に大きいことを示した。

謝 辞

終りに、本研究に関し、終始御懇篤なる御指導を賜りました京都大学教授大久保達郎先生始め、京都大学工学部電気電子両教室の諸先生に厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- (1) W. W. Lewis ; *The Protection of Transmission Systems against Lightning* pp 116. John Wiley & Sons. 1950
- (2) 三田, 法貴 ; 絶縁と閃絡防止 pp 209. オ-4社. 昭和26年
- (3) E. D. Sunde ; *Earth Conduction Effects in Transmission Systems.* pp 77 1948 D. Van Nastrand.
- (4) 谷 安正 ; 静電場 pp 206. 河出書房 昭和17年
- (5) Town ; *Impulse Characteristic of Driven Grounds.* G. E. Rev. Vol. 31 (1928) pp 605
- (6) P. L. Bellasche ; *Impulse and 60 cycle Characteristics of Driven Grounds I.* A. I. E. E. Vol. 60 (1941) pp 123.
- (7) G. M. Petropoulos ; *The High-Voltage Characteristics of Earth Resistances I.* J. I. E. E Vol 95 (1948) pt I. pp 59
- (8) J. M. Meek ; *A Theory of Spark Discharge.* Phy. Rev. Vol. 57 (1940) pp 722
- (9) 三田 ; 衝突電圧試験の実際 p 64. オ-4社 昭和27年
- (10) 本多 ; 刃形電極の交流火花特性. 昭和3年5月 pp 543. 理研彙報
- (11) 電気学会 ; 放電現象 p 72. 電気学会 昭和26年
- (12) 西, 本多 ; 交流回路に放ける火花放電の研究, 電学誌 第47輯. 昭和2年. p 1135.
- (13) 西脇 ; 円筒電極及び刃形電極間の火花放電に関する研究, 昭和3年 仙台大会 予稿 p 27
- (14) 川村 ; 農林土壤学 p 164 養賢堂 昭和35年
- (15) 森 ; 土の電気伝導について. 土木学会誌 37巻 p 481
- (16) W. R. Heller ; *Kinetic-Statistical Theory of Dielectric Breakdown in Non-Polar Crystals.* Phy. Rev. Vol. 84 (1951) pp 1130.
- (17) 電気学会 ; 放電ハンドブック. p 284. 電気学会. 昭和33年

- (18) R. W. Crowe : *Electric Strength and Molecular Structure of Saturated Hydrocarbon Liquids*. J. Appl. Phys. Vol 25. (1954) p 1480
- (19) 大久保, 西原 : 衝暈電流に対する接地抵抗 (II) 昭和 29 年
関西支連大. 347
- (20) H. Raether : *Untersuchung der Elektronenlawine mit der Nebelkammer*. Zeitschrift der Physik. Bd. 107 (1937) S. 19
- (21) 大久保, 西原 : 衝暈電流に対する接地抵抗 (I). 電気三学会関西支連大. 346. 昭和 29 年
- (22) 大久保, 西原 : 衝暈電流に対する接地抵抗 (IV). 電気三学会連大. 380 昭和 31 年
- (23) P. L. Bellaschi : *Impulse and 60 cycles Characteristics of Driven Grounds* (II) A. I. E. E. Vol 61 (1942) pp 349
- (24) E. D. Sunde : *Discussion*, A. I. E. E. Vol 64 (1945) pp 427
- (25) 興津 : 表面電荷と沿面放電, 電学誌 第 55 輯 (昭和 10 年) pp 1052
- (26) 鳥山 : 固体絶縁物破壊について, 電学誌 第 52 輯 (昭和 7 年) pp 551.
- (27) 稲田 : 固体絶縁物中に生ずるストリーマ, 電気三学会支連大.
昭和 28 年 57.
- (28) 大久保, 西原 : 衝暈電流に対する接地抵抗 (III). 電気三学会連大.
昭和 30 年 386
- (29) 大久保, 林 : 衝暈電流に対する接地抵抗 (V) 電気学会関西支連大.
昭和 31 年. 91
- (30) 大久保, 林 : 衝暈電流に対する接地抵抗 (XIII) 電気学会連大.
昭和 35 年 908.
- (31) H. Norinder et O. Salha : *Stopwiderstände der verschiedenen Erdelektroden und Einbettung Materiellen* A. S. E. Mai. 1951. S. 321
- (32) 大久保, 林 : 衝暈電流に対する接地抵抗 (VI) 電気学会連大
昭和 33 年 581

- (33) 大久保, 高橋; 衝電流に対する接地抵抗 (X), 電気学会連大,
昭和34年 563
- (34) 大久保, 黒木; 衝電流に対する接地抵抗 (XII) 電気学会関西連大
昭和35年 125
- (35) 吉川; 送電線鉄塔基礎の衝電流に対する接地効果について,
電気学会関西連大 昭和31年 90
- (36) L. V. Bewley; *Traveling Waves on Transmission Systems*.
2nd Edition p 210. 1951 John Wiley & Sons.
- (37) Sunde; *Earth Conduction Effect*. p 256.
- (38) Wagner; 演算子法, 林 重憲訳 電気日本社 昭和19年